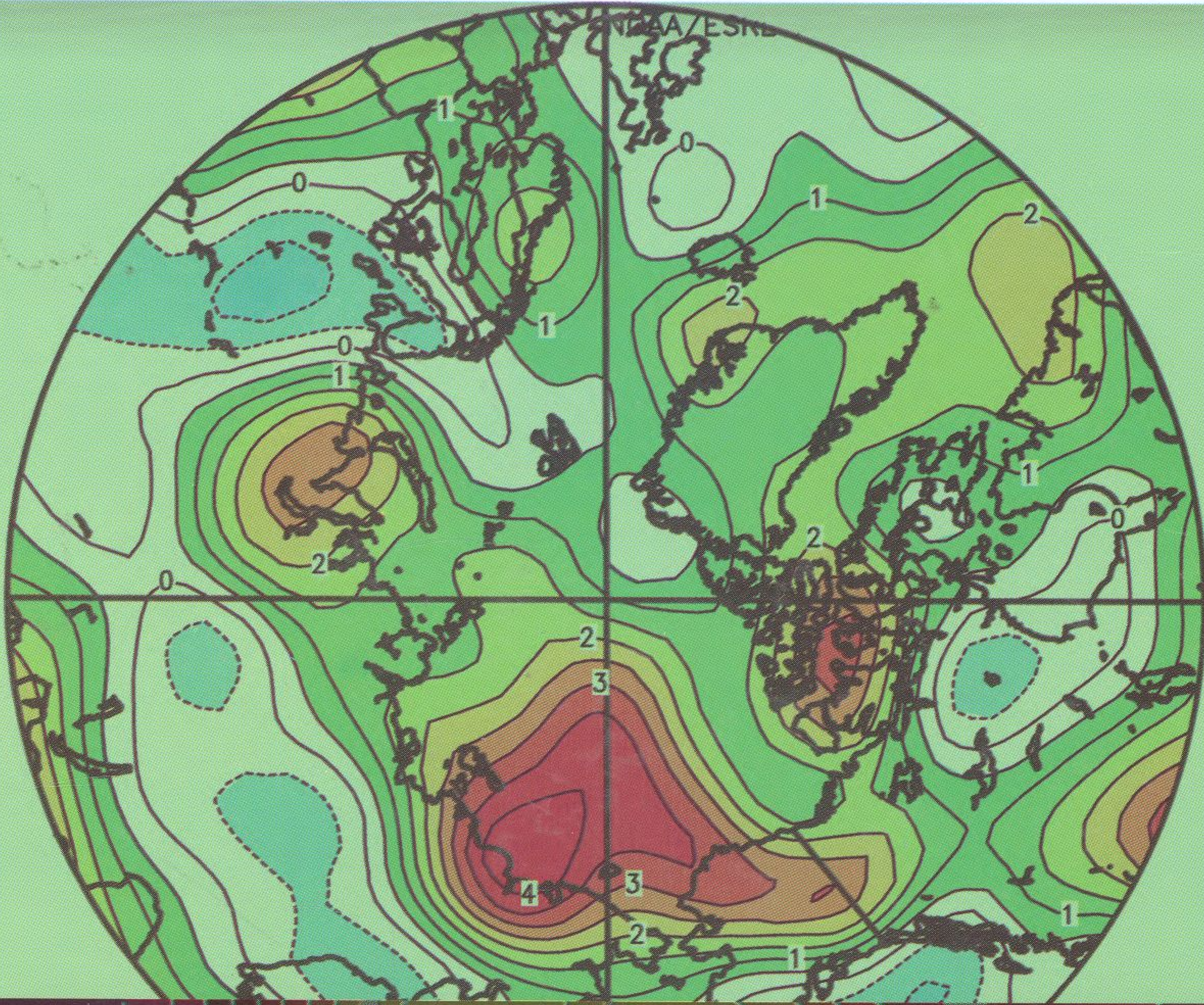
نصري علي عفونة

فيزياء القصور الحراري
الأنتروبيا





دار جرير
للنشر والتوزيع
www.darjareer.com


www.darjareer.com


www.darjareer.com



فيزياء القصور الحراري

الإنتروبيا

الكمّات ، الحوادث المغناطيسية، الانتروبيا (القصور الحراري)، اطر الإسناد والأثير، المجال المغناطيسي الأرضي، الزمان، الجاذبية الأرضية، التعامل مع شعاع الليزر في المختبر والحق، المرايا والعدسات، التحريض الكهرطيسي، تطبيق على علاقات ماكسويل

فيزياء القصور الحراري

نصري علي عفونة

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2009/11/4846)

رقم التصنيف : 536

الواصفات:/الفيزياء// الحرارة/

الطبعة الأولى 1431هـ - 2010م

دار جرير
للنشر والتوزيع

عمّان-شارع الملك حسين- مقابل مجمع الفحيص التجاري

هاتف : 4651650 - فاكس : 4643105 6 962+

ص . ب . : 367 عمّان 11118 الأردن

www.darjareer.com- E-mail: info@darjareer.com

ردمك ISBN 978- 9957 – 38 – 182-0

فيزياء القصور الحراري

الإنتروبيا

الكمّات، الحوادث المغناطيسية، الانتروبيا (القصور الحراري)، أطر الإسناد والأثير، المجال المغناطيسي الأرضي، الزمان، الجاذبية الأرضية، التعامل مع شعاع الليزر في المختبر والحق، المرايا والعدسات، التحريض الكهرطيسي، تطبيق على علاقات ماكسويل

نصري علي عفونة

الطبعة الأولى

2010م - 1431هـ



دار جرير للنشر والتوزيع

الفهرس

المقدمة

ترسّمت دار جرير للنشر والتوزيع منذ تأسيسها نهج رفد المكتبة العربية بكل ما يفيد المهتمين والدارسين من كتب أكاديمية بمختلف صنوفها، فضلاً عن الموسوعات، وإبداع الشعراء، وكتاب القصة والمسرحيات وغيرها من المنشورات الهادفة والمدروسة وكل ما هو نافع من الثقافة والمعارف والدراسات الإنسانية والعلوم والآداب.

وتفخر دار جرير اليوم، وهي تقدم سلسلة من كتب الفيزياء الكلاسيكية والحديثة لدارسي الفيزياء والمهتمين بها. وقد دأبت في خطواتها اعتماد المراجع الموثوق بها عربية ومترجمة، ودقة البحث والتمحيص، والغوص في أعماق المعلومات، لتأخذ بأيدي الدارسين إلى قمم المجد وتشد على أيديهم لتجعل منهم مهندسي حضارة، وبناة أمة، وقادة عظماء، وتحفزهم على المثابرة وبذل المزيد من الجد والاجتهاد، ليزهو علمهم أقماراً وضيئة، ونجوماً زاهرة متألقة في جباههم.

لقد جاءت منشوراتها لتوفر على روادها الوقت والجهد، وتربأ بالمهتم إلى مدارج العلم والمعرفة والثقافة.

إن منشورات دار جرير بحق جديرة بالاهتمام والاطلاع والاقتناء.

﴿وَمَآ أُوتِيتُم مِّنَ ٱلْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا﴾

والله من وراء القصد

الناشر



الفصل الأول

الكمّات

الفصل الأول

الكمّات

الاستمرار – الانقطاع:

نفتح أمامنا خريطة لمدينة نيويورك وضواحيها، ونسأل ما هي النقاط على هذه الخريطة التي يمكن الوصول إليها بالقطار؟ وبعد البحث عن هذه النقاط في جدول مواعيد السكة الحديد نقوم بتسجيلها على الخريطة. ونبدل الآن السؤال فنسأل ما هي النقاط التي يمكن الوصول إليها بالسيارة؟ وإذا رسمنا خطوطاً على الخريطة تمثل جميع الطرق التي تبدأ من نيويورك، فكل نقطة على هذه الطرق يمكن الوصول إليها بالسيارة. في المرة الأولى كانت النقاط منفصلة عن بعضها البعض وتمثل محطات سكة الحديد المختلفة، أما في المرة الثانية فإن النقاط موجودة على طول الخطوط التي تمثل الطرق. وسؤالنا التالي عن المسافات التي تفصل هذه النقاط عن نيويورك، أو بشكل أدق، عن المسافات التي تفصلها عن نقطة معينة في المدينة. في الحالة الأولى، نجد أن بعض الأرقام تقابل النقاط على الخريطة. وهذه الأرقام تتغير بشكل غير نظامي عن طريق قفزات محدودة دائماً. وهكذا نقول: إن المسافات التي تفصل بين نيويورك والأمكنة التي يمكن الوصول إليها بالقطار تتغير فقط بشكل متقطع discontinuous، أما المسافات بين نيويورك والأمكنة التي يمكن الوصول إليها بالسيارة فيمكن أن تتغير بخطوات صغيرة قدر ما نريد، أي أنها تتغير بشكل مستمر continuous. إن تغيرات المسافة يمكن أن تكون صغيرة على نحو اعتباطي في حالة السيارة وليس في حالة القطار.

إن استخراج الفحم من منجم يمكن أن يتغير بشكل مستمر، إذ أن كمية الفحم المنتجة يمكن إنقاصها أو زيادتها بمقادير صغيرة على نحو اعتباطي. إلاّ أن عدد العمال

الذين يعملون في المنجم يمكن أن يتغير فقط بشكل متقطع وسيكون بلا معنى القول بأن عدد العمال ازداد 3.783 عامل منذ البارحة.

إذ سُئِل رجل عن كمية المال التي في جيبه فيمكن أن يعطي رقماً يتضمن عددين عشريين فقط. فكمية المال يمكن أن تتغير فقط بقفزات وبطريقة متقطعة. في الولايات المتحدة الأمريكية يعتبر "السنت" Cent أصغر وحدة نقدية، وهذا ما سنسميه "الكمّ الأولي" للعملة الأمريكية. أما الكم الأولي للعملة الإنكليزية فهو "الفاردنغ" Farthing(*) ويساوي فقط نصف الكمّ الأولي الأمريكي. لدينا هنا مثل عن كمّين أوليين يمكن القيام بمقارنة قيمتيهما. إن نسبة قيمتيهما لها معنى محدد، لأن قيمة أحدهما تساوي ضعف قيمة الآخر.

ونستطيع القول إن بعض الكميات يمكن أن تتغير بشكل مستمر وأخرى تتغير فقط بشكل متقطع بواسطة خطوات لا يمكن إنقاصها أكثر. هذه الخطوات التي لا يمكن تقسيمها تسمى الكمّات الأولية elementary quanta بالنسبة للكمية المعنية التي تشكلها هذه الكمّات.

يمكننا أخذ وزن كميات كبيرة من الرمل واعتبار كتلها على أنها مستمرة مع أن بنيتها الحبيبية واضحة. ولكن إذا أصبح الرمل شيئاً ثميناً واستخدمت موازين حسّاسة جداً لوزنه، عند ذلك يجب أن نعتبر أن الكتلة تتغير دائماً بعدد مضاعف لكتلة الحبة الواحدة. وسوف تكون كتلة الحبة الواحدة هي كمّنا الأولي. ومن هذا المثل يتضح لنا كيف أن الصفة المتقطعة لكمية معينة، والتي تعتبر حتى الآن على أنها مستمرة، يمكن الكشف عنها بزيادة الدقة في قياساتنا.

وإذا أردنا أن نصف الفكرة الأساسية لنظرية الكمّ بجملة واحدة، نقول: يجب أن نفترض أن بعض الكميات الفيزيائية، التي تعتبر مستمرة حتى الآن، إنما تتألف من كمّات أولية.

(*) قطعة نقدية كانت تساوي ربع بنس ولم تعد مستخدمة – المترجم.

إن ميدان الوقائع الذي تغطيه نظرية الكمّ كبير جداً. ولقد تمّ الكشف عن هذه الوقائع بواسطة تقنيات التجارب الحديثة المتطورة جداً. وبما أننا لا نستطيع أن نبين ولا حتى أن نصف التجارب الأساسية، فسوف نضطر مراراً إلى نقل نتائجها بشكل دوغماتي. وغايتنا هي أن نشرح فقط الأفكار الرئيسية التي تشكل قاعدة هذه النظرية.

الكمّات الأولية للمادة والكهرباء:

في الصورة التي رسمتها النظرية الحركية عن المادة، يظهر أن جميع العناصر مبنية من جزيئات. لنأخذ الهيدروجين الذي هو العنصر الأخف. لقد رأينا في الصفحة 54 كيف أن دراسة الحركات البراونية أدّت إلى حساب كتلة جزيء واحد من الهيدروجين وقيمتها هي:

0.000 000 000 000 000 000 000 0033 غرام

وهذا يعني أن الكتلة متقطعة. فكتلة كمية الهيدروجين لا تتغير إلاّ بعدد صحيح من الخطوات الصغيرة، حيث تقابل كل خطوة منها كتلة جزيء واحد من الهيدروجين. ولكن العمليات الكيميائية بينت أن جزيء الهيدروجين يمكن تفكيكه إلى جزئين، أو بعبارة أخرى، إن جزيء الهيدروجين مؤلف من ذرتين. وفي العمليات الكيميائية تلعب الذرة دور الكمّ الأولي وليس الجزيء. وإذا قسمنا العدد السابق على اثنين نحصل على كتلة ذرة الهيدروجين وقيمتها حوالي: 0.0000000000000000000000017 غراماً.

الكتلة كمية متقطعة، لكن لا حاجة بنا إلى الاهتمام بذلك في عملية الوزن. فحتى أكثر الموازين حساسية تبقى بعيدة عن الوصول إلى درجة الدقة التي يمكن بواسطتها الكشف عن الانقطاع في تغيّر الكتلة.

لنعد الآن إلى أمر معروف جيداً. معنا سلك معدني متصل بمنبع للتيار، والتيار يتدفق في السلك من الكمون الأعلى إلى الكمون الأدنى. نحن نذكر أن عدة وقائع تجريبية تمّ تفسيرها بالنظرية البسيطة للموائع الكهربائية التي تجري في السلك، أن مسألة تحديد إن كان المائع الموجب يجري من الكمون الأعلى إلى الأدنى أو أن المائع السالب

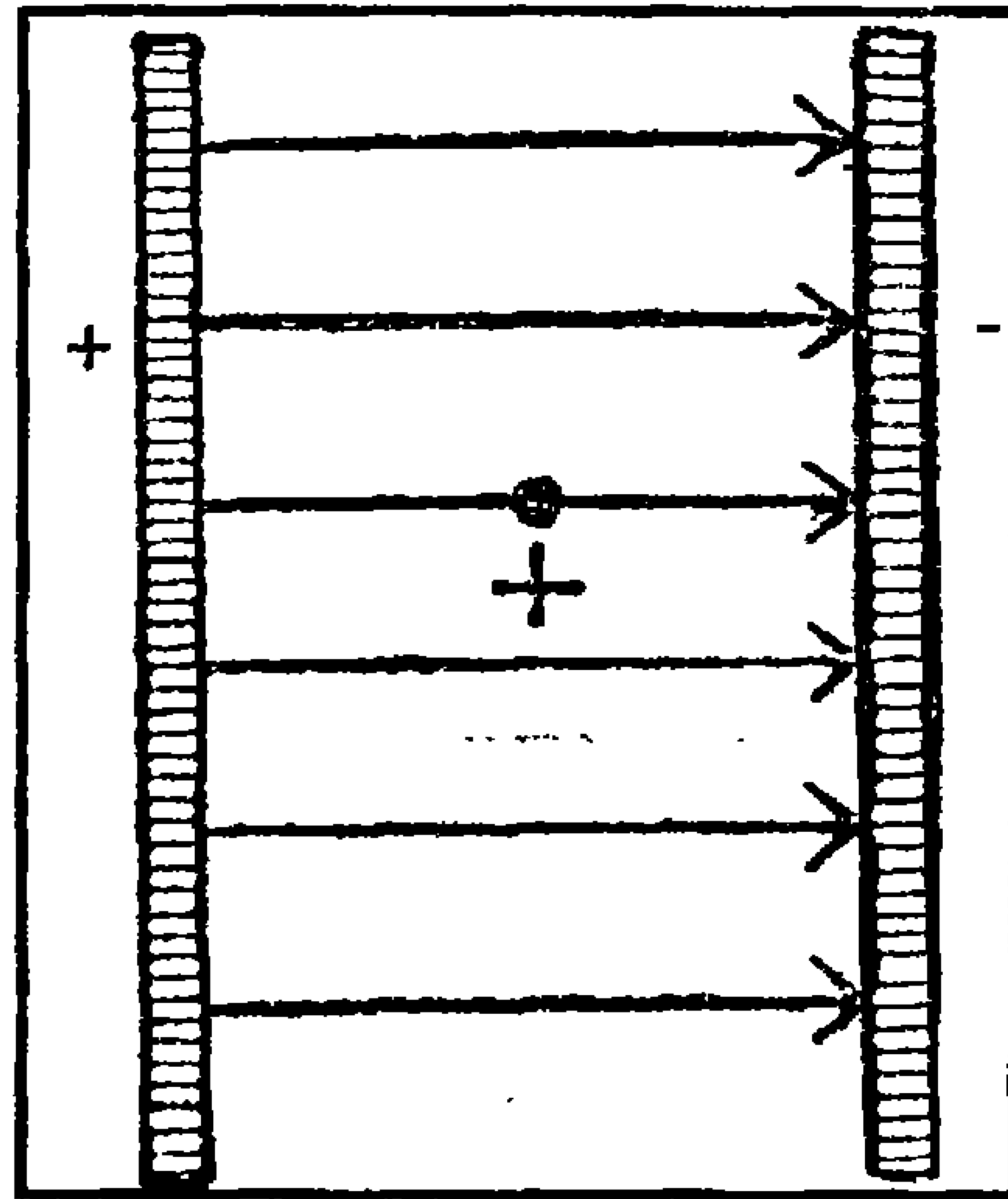
يجري من الكمون الأدنى إلى الأعلى كانت بكل بساطة مسألة اصطلاح. سنضع جانباً في الوقت الحاضر كل التقدم اللاحق الذي نتج عن مفاهيم الحقل. وحتى عند التفكير بلغة الموائع الكهربائية تبقى بعض الأسئلة بحاجة إلى توضيح. فكلمة "مائع" توحي بأنه كان ينظر إلى الكهرباء في أيامها الأولى على أنها كمية مستمرة. وحسب هذه النظرة القديمة فإن قيمة الشحنة الكهربائية يمكن أن تتغير بخطوات صغيرة كيفية وليس من الضروري وجود كمّات كهربائية أولية. لقد سمحت إنجازات النظرية الحركية للمادة بطرح سؤال جديد: هل توجد كمّات أولية للموائع الكهربائية؟ وهناك سؤال آخر يتطلب الإجابة عنه: هل التيار الكهربائي مؤلف من تدفق مائع موجب أو سالب أو من الاثنين معاً؟

إن الفكرة في كل التجارب التي حاولت الإجابة عن هذه الأسئلة تكمن في نزع المائع الكهربائي من السلك وتركه يسافر عبر الفضاء الفارغ وحرمان من أي ترافق مع المادة، ثم القيم بعد ذلك بدرس خصائصه التي يجب أن تظهر بشكل واضح جداً في هذه الظروف. لقد أجري العديد من هذا النوع من التجارب في أواخر القرن التاسع عشر. وقبل الدخول في شرح فكرة هذه التجارب فإننا سنعرض النتائج في حالة واحد على الأقل. إن المائع الكهربائي الجاري في السلك هو سالب وبالتالي يتجه من الكمون الأدنى إلى الأعلى. لو كنّا نعرف ذلك منذ البدء، عندما وضعت نظرية الموائع الكهربائية، لكنا بدلنا بالتأكيد الكلمات وسمينا كهرباء القضيب المطاطي موجبة وكهرباء القضيب الزجاجي سالبة، وكان من الممكن أن يناسبنا أكثر اعتبار المائع الذي يجري موجباً. وبما أن تخميننا الأول لم يكن صائباً، علينا الآن أن نتكيف مع هذا الأمر غير المريح. والسؤال المهم الذي يطرح فيما بعد هو معرفة ما إذا كانت بنية هذا المائع السالب "حبيبية"، وما إذا كان مؤلفاً من كمّات كهربائية أم لا. وهنا أيضاً يبين العديد من التجارب المستقلة بأنه لا شك في وجود كمّ أولي لهذه الكهرباء السالبة. فالمائع الكهربائي السالب مكون من حبوب، كما يتكون الشاطئ من حبوب الرمل أو يبنى البيت من الحجارة. وصاغ هذه النتيجة بشكل أكثر وضوحاً "تومسون J.J.Thomson"، منذ حوالي أربعين سنة(*)، وسميت هذه الكمّات الأولية للكهرباء السالبة بالإلكترونات

(*) نذكّر بأن هذا الكتاب صدر للمرة الأولى سنة 1938 – المترجم.

electrons. وهكذا فإن كل شحنة كهربائية سالبة مؤلفة من العديد من الشحنات الأولية الممثلة بالإلكترونات، وإن الشحنة السالبة، كما الكتلة، تتغير فقط بشكل متقطع. لكن الشحنة الكهربائية الأولية صغيرة لدرجة أنه في العديد من الأبحاث من الممكن وحتى أنه في بعض الأحيان من المستحسن اعتبار الشحنة كمية مستمرة. وهكذا تُدخل نظريتنا الذرة والإلكترون إلى العلم كميات فيزيائية متقطعة تتغير فقط على شكل قفزات.

لنتخيل الآن صفيحتين معدنيتين متوازيتين موجودتين في مكان سحب منه كل الهواء، إحدى الصفيحتين عندها شحنة موجبة والأخرى شحنة سالبة. وإذا وضعنا شحنة اختبارية موجبة بين الصفيحتين فسوف تنبذه الصفيحة الإيجابية الشحنة وتجذبه الصفيحة السالبة الشحنة، وعندها تكون خطوط القوة للحقل الكهربائي متجهة من الصفيحة الموجبة الشحنة إلى الصفيحة السالبة الشحنة. أما القوة التي تفعل على الجسم الاختباري السالب الشحنة فستكون في الاتجاه المعاكس. وإذا كانت الصفيحتان كبيرتين بما فيه الكفاية، فإن خطوط القوة بينهما سوف تكون متساوية في الكثافة في كل مكان، ولا يهم أين نضع الجسم الاختباري، إذ أن القوة، وبالتالي كثافة خطوط القوة، سوف تكون ذاتها. وسوف تسلك الإلكترونات الموضوعة بين الصفيحتين سلوك قطرات المطر في حقل جاذبية الأرض وتتحرك في خطوط متوازية من الصفيحة السالبة الشحنة إلى الصفيحة الموجبة الشحنة.



الشكل 1

ويوجد العديد من التجارب المعروفة التي تدفع بوابل من الإلكترونات إلى مثل هذا الحقل فيوجهها كلها بنفس الطريقة. وأبسط هذه التجارب هي القيام بوضع سلك محمّى بين الصفيحتين المشحونتين، فيبدأ هذا السلك بإصدار إلكترونات يجري توجيهها فيما بعد من قبل خطوط قوة الحقل الخارجي. فمثلاً، تستند الأصمّة الإلكترونية radiotubes المعروفة من قبل الجميع، إلى هذا المبدأ.

لقد أجري الكثير من التجارب البارعة حول الحُزَمْ beams الإلكترونية، ودُرس انحراف مسارها في حقول كهربائية ومغنطيسية خارجية مختلفة. وقد أمكن عزل إلكترون واحد وتحديد شحنته الأولية وكتلته، أي مقاومته العطالية لفعل قوة خارجية. وسوف نكتفي هنا بذكر قيمة كتلة الإلكترون، وهي تقل حوالي ألفي مرة عن كتلة ذرة الهيدروجين. وهكذا تظهر كتلة ذرة الهيدروجين بالرغم من صغرها كبيرة جداً بالمقارنة مع كتلة الإلكترون. ومن وجهة نظر نظرية الحقل المنسجمة، تشكل كل كتلة الإلكترون، أي كل طاقته، طاقة حقله، وتقع الشدّة الأكبر للحقل داخل كرة صغيرة جداً وتضعف بعيداً عن "مركز" الإلكترون.

لقد قلنا سابقاً إن ذرة عنصر معين تعتبر كمّه الأولي الأصغر، وكنا نعتقد ذلك لمدة طويلة، ولكن الآن لم يعد الأمر كذلك. لقد كوّن العلم نظرة جديدة أظهرت قصور النظرية القديمة. ونادراً ما نجد في الفيزياء مقولة تستند بقوة إلى الوقائع أكثر من استناد بنية الذرة المعقدة إليها. لقد عرفنا، قبل كل شيء، أن الإلكترون الذي هو الكمّ الأولي للمائع الكهربائي السالب، هو أيضاً أحد العناصر المكونة للذرة، أي إحدى اللّبنات الأولية الداخلة في بناء المادة. إن المثل المذكور سابقاً عن السلك المحمّى الذي تنبعث منه الإلكترونات ليس إلاّ أحد الأمثلة العديدة عن استخراج هذه الجسيمات من المادة، كما إن هذه النتيجة التي تربط بقوة بين مسألة بنية المادة ومسألة الكهرباء تم استخلاصها بدون أدنى شك من عدد كبير من الوقائع التجريبية المستقلة.

من السهل نسبياً أن نستخرج من الذرة بعضاً من الإلكترونات التي تكونها. ويمكن القيام بذلك بواسطة الحرارة، كما كانت الحال في مَثَل السلك المحمّى، أو بطريقة أخرى مثل رجم الذرات بواسطة بعض الإلكترونات الأخرى.

لنفترض أن سلكاً معدنياً رفيعاً جرت تحميته حتى الاحمرار وأدخل في غاز الهيدروجين المتخلخل، فإنه سوف تنبعث من السلك إلكترونات في كل الاتجاهات. وتحت تأثير فعل كهربائي خارجي تأخذ هذه الإلكترونات سرعة معينة، ويزيد الإلكترون في سرعته تماماً كما يفعل الجسم الساقط تحت تأثير حقل الجاذبية. وبهذه الطريقة فإننا نحصل على حزمة من الإلكترونات مندفعة بسرعة محددة في اتجاه محدد. ويمكننا في الوقت الحاضر الحصول على سرعات تقارب سرعة الضوء عن طريق إخضاع الإلكترونات لتأثير فعل حقول قوية جداً. ولكن، ماذا سيحدث، عندما تصطدم حزمة من الإلكترونات ذات سرعة محددة بجزيئات الهيدروجين المتخلخل؟ إن الصدم الناتج عن إلكترون سريع بما فيه الكفاية سوف لن يمزق جزيء الهيدروجين إلى ذرتين فحسب بل سوف يقتلع أيضاً إلكتروناً من إحدى هاتين الذرتين.

دعونا نتقبل الواقع الذي يقول إن الإلكترونات هي من مكوّنات المادة، فعندها لا يمكن أن تكون الذرة التي اقتلع منا إلكترون محايدة كهربائياً. وإذا كانت هذه الذرة حيادية في السابق، فإنها لن تكون كذلك الآن لأنها حُرمت من شحنة أولية واحدة، والذي يتبقى منها يجب أن يكون ذا شحنة موجبة. ونظراً لأن كتلة الإلكترون أصغر بكثير من كتلة الذرة الأخف، يمكننا القول باطمئنان أن الجزء الأكبر من كتلة الذرة لا يتمثل في الإلكترونات بل في القسم المتبقي من الجسيمات الأولية التي هي أثقل بكثير من الإلكترونات. وسنسمي هذا الجزء الثقيل من الذرة نواتها nucleus.

لقد طورت الفيزياء التجريبية الحديثة طرقاً تسمح بتفكيك نواة الذرة وتحويل ذرات عنصر معين إلى ذرات عنصر آخر، واستخراج الجسيمات الأولية الثقيلة من النواة التي تدخل في بنائها. إن هذا الفصل من الفيزياء المعروف باسم "الفيزياء النووية"، والذي ساهم فيه كثيراً "رذرفورد Rutherford" هو الأكثر متعة من وجهة النظر التجريبية. ولكن لا تزال تنقصنا النظرية البسيطة في أفكارها الأساسية والتي تربط التنوع الغني للوقائع في ميدان الفيزياء النووية. وبما أننا، في هذه الصفحات، مهتمون فقط بالأفكار الفيزيائية العامة، فسوف نضع هذا الفصل جانباً على الرغم من أهميته الكبيرة بالنسبة للفيزياء الحديثة.

كمّات الضوء:

لنأخذ جداراً مبيناً على طول شاطئ البحر. إن موجات البحر ترتطم بالجدار بشكل مستمر وتنتزع جزءاً من سطحه ثم تتراجع تاركة الطريق حرة للموجات الأخرى القادمة. تتناقص كتلة الجدار بحيث يمكننا أن نتساءل كم ينتزع منه خلال سنة مثلاً. لنتصور الآن عملية أخرى: نحن نريد أن ننقص كتلة الجدار بنفس المقدار السابق ولكن بوسيلة مختلفة، نطلق الرصاص على الجدار مما يؤدي إلى تفتته في الأمكنة التي يصيبها. وهكذا تتناقص كتلة الجدار، ونستطيع أن نفترض أن نفس الكمية من الكتلة ستنقص في الحالتين. ولكن من منظر الجدار يمكننا بسهولة معرفة ما إذا كانت موجات البحر المتواصلة أم وابل الرصاص المتقطع هو الذي فعل ذلك. وسيكون مفيداً لنا في فهم الظواهر التي نحن بصددها أن نذكر الفرق بين فعل موجات البحر وفعل وابل الرصاص.

لقد قلنا سابقاً أن السلك المحمّى يصدر الإلكترونات. ونحن نريد أن نقدم هنا وسيلة ثانية لاستخراج الإلكترونات من المعدن. لنفترض أن ضوءاً متجانساً كالضوء البنفسجي مثلاً، الذي هو كما نعلم ضوء له طول موجي محدد، يرتطم بسطح معدن، فإن سيلاً من الإلكترونات ينتزع من المعدن وينطلق وابل منه بسرعة معينة. من وجهة نظر مبدأ الطاقة يمكننا القول إن طاقة الضوء تحوّلت جزئياً إلى طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة. وتسمح لنا التقنيات التجريبية الحديثة بتسجيل هذه الرصاصات الإلكترونية وتحديد سرعتها وبالتالي طاقتها. إن عملية استخراج الإلكترونات بواسطة الضوء المتساقط على المعدن تدعى العملية الكهروضوئية Photoelectric effect.

لقد كانت نقطة البدء عندنا فعل موجة ضوئية متجانسة ذات شدة معينة. وكما هي الحال في كل التجارب علينا أن نقوم بتعديل تجهيزاتنا لنرى مدى تأثير هذا التغيير على النتيجة الملاحظة.

لنبدأ بتغيير شدة الضوء البنفسجي المتجانس والمتساقط على الصفيحة المعدنية ونسجل إلى أي مدى تتوقف طاقة الإلكترونات المنبعثة على شدة الضوء. دعونا نحاول

إيجاد الجواب على ذلك عن طريق التعليل بدلاً من التجربة. ونستطيع تقديم الحجة كما يلي: في العملية الكهرضوئية يتحول جزء معين من طاقة الإشعاع إلى طاقة حركية للإلكترونات. وإذا أرسلنا مجدداً على المعدن ضوءاً له نفس طول الموجة ولكنه صادر عن منبع أقوى فإن طاقة الإلكترونات المنبعثة ستكون أكبر لأن للإشعاع الجديد طاقة أكبر، ولذلك علينا أن نتوقع زيادة سرعة الإلكترونات إذا زادت شدة الضوء. إلا أن التجربة تناقض مرة أخرى توقعاتنا. ومرة أخرى نرى أن قوانين الطبيعة ليست كما نحبها أن تكون. فنحن أمام إحدى التجارب التي بمناقضتها لتوقعاتنا، تقلب النظرية التي ترتكز إليها تلك التوقعات. إن النتيجة الحقيقية للتجربة مدهشة من وجهة نظر النظرية الموجية، حيث أن جميع الإلكترونات المرصودة لها نفس السرعة ونفس الطاقة التي لا تتغير مع زيادة شدة الضوء.

لقد كان من غير الممكن توقّع هذه النتيجة التجريبية عن طريق النظرية الموجبة. ومرة أخرى تولد نظرية جديدة من الصراع بين النظرية القديمة والتجربة.

نريد أن نكون عن قصد غير منصفين تجاه النظرية الموجبة للضوء ونتناسى إنجازاتها الكبيرة وشرحها الرائع لانحناء الضوء حول العوائق الصغيرة جداً. نقوم بتركيز اهتمامنا على العملية الكهرضوئية ونطلب من هذه النظرية تفسيراً ملائماً لها. بالطبع لا يمكننا أن نستنتج من النظرية الموجبة استقلالية طاقة الإلكترونات عن شدّة الضوء الذي بواسطته جرى انتزاع هذه الإلكترونات من الصفيحة المعدنية، لذلك سوف نحاول الاستعانة بنظرية أخرى. إننا نذكر أن نظرية نيوتن الجسيمية، التي تشرح العديد من الظواهر الضوئية الملاحظة، لم تنجح في تفسير مسألة انحناء الضوء التي نريد إهمالها عن قصد الآن. في زمن نيوتن لم يكن مفهوم الطاقة موجوداً، فالجسيمات الضوئية كانت عديمة الوزن، وكل لون كان يحافظ على صفته الجوهرية الخاصة. وعندما استحدث مفهوم الطاقة فيما بعد وأدرك أن الضوء يحمل طاقة، لم يكن بحسبان أحد التفكير بتطبيق هذه المفاهيم على النظرية الجسيمية للضوء. لقد اعتبرت نظرية نيوتن ميتة، ولم تجر محاولة إحيائها جدياً حتى هذا القرن.

وإذا اكتفينا بالفكرة الأساسية للنظرية النيوتونية، فإنه يتعين علينا أن نفترض بأن الضوء المتجانس مؤلف من حبوب طاقوية ويجب أن نحلّ محل الجسيمات الضوئية القديمة كمّات الضوء التي سنسميها الفوتونات photons، وهي أجزاء صغيرة من الطاقة تنتقل بسرعة الضوء في الفضاء الفارغ. إن إعادة إحياء النظرية النيوتونية على هذا الشكل الجديد يؤدي إلى نظرية الكمّات الضوئية quantum theory of light. فليس للمادة والشحنة الكهربائية فحسب بنية حبيبية، بل إن الطاقة الإشعاعية لها أيضاً هذه الصفة، أي أنها مركبة من كمّات ضوئية. فبالإضافة إلى كمّات المادة وكمّات الكهرباء توجد أيضاً كمّات الطاقة.

لقد أدخلت فكرة كمّات الطاقة لأول مرة من قبل "بلانك Planck" في بداية هذا القرن بهدف شرح بعض التأثيرات الأشد تعقيداً من الكهرضوئية. ولكن الكهرضوئية بينت بشكل واضح وبسيط ضرورة تغيير مفاهيمنا القديمة.

بات من الواضح لدينا أن هذه النظرية لكمّات الضوء تقدم تفسيراً مقبولاً للكهرضوئية. إذا سقط وابل من الفوتونات على صفيحة معدنية، فإن فعل الإشعاع على المادة يتألف هنا من عدد كبير من العمليات الإفرادية، حيث في كل عملية يضرب الفوتون الذرة وينتزع منها إلكتروناً. وتتماثل جميع هذه العمليات الإفرادية، بحيث يكون للإلكترون المنتزع نفس الطاقة في جميع الحالات. ونفهم أيضاً بأن زيادة شدة الضوء تعني في لغتنا الجديدة زيادة عدد الفوتونات المتساقطة، حيث يصبح في هذه الحالة عدد الإلكترونات المنتزعة من الصفيحة المعدنية مرتفعاً. إلاّ أن طاقة كل منها لا تتغير. وهكذا نرى أن هذه النظرية تتوافق تماماً مع الملاحظة.

ماذا سيحدث إذا سقط شعاع ضوئي متجانس من لون آخر، أحمر مثلاً بدل البنفسجي، على السطح المعدني؟ لندع التجربة تجيب عن هذا السؤال. ونقوم بقياس طاقة الإلكترونات المنتزعة ونقارنها مع طاقة الإلكترونات المنتزعة بالضوء البنفسجي. نجد أن طاقة الإلكترون المنتزع بواسطة الضوء الأحمر أصغر من طاقة الإلكترون المنتزع بالضوء بالبنفسجي، مما يعني أن طاقة كمّات الضوء تختلف باختلاف الألوان. إن الفوتونات التي تنتمي إلى الضوء الأحمر تبلغ طاقتها نصف طاقة الفوتونات التي تنتمي

إلى الضوء البنفسجي. أو بشكل أدق يمكن القول إن طاقة كمّ الضوء من لون متجانس تتناقص تناسبياً مع تزايد طول الموجة. وهناك فرق أساسي بين كمّات الطاقة وكمّات الكهرباء. فكمّات الضوء تختلف باختلاف طول الموجة، بينما تبقى كمّات الكهرباء دائماً ذاتها. وإذا كان من المسموح أن نستخدم أحد تشابيهنا السابقة، فإنه يمكننا مقارنة كمّات الضوء بأصغر الكمّات النقدية التي تختلف باختلاف البلدان.

لنتابع إهمال النظرية الموجية للضوء ونفترض أن بنية الضوء حبيبية ومؤلفة من كمّات ضوئية، أي من فوتونات تنتقل في الفضاء بسرعة الضوء. وهكذا يتكون الضوء، حسب الصورة الجديدة، من وابل من الفوتونات، بينما يشكل الفوتون الكمّ الأولي لطاقة الضوء. ولكن عندما نهمل النظرية الموجية للضوء، فإن مفهوم طول الموجة يختفي من الوجود، ويحل محلّه مفهوم طاقة كمّات الضوء. ويمكن ترجمة التعابير الواردة بلغة النظرية الموجية إلى لغة النظرية الكمية للإشعاع. فمثلاً:

مصطلحات النظرية الموجبة	مصطلحات نظرية الكمّات
إن للضوء المتجانس طول موجي محدد وإن طول موجة اللون الأحمر من الطيف أكبر مرتين من طول موجة اللون البنفسجي	يحتوي الضوء المتجانس على فوتونات ذات طاقة محددة. وتبلغ طاقة فوتون الضوء الأحمر من الطيف نصف طاقة اللون البنفسجي.

ويمكن اختصار الوضع على الشكل التالي: توجد ظواهر يمكن تفسيرها بواسطة نظرية الكمّات، وليس عن طريق النظرية الموجية. وتقدم الكهرضوئية مثلاً على ذلك، علماً بأن هنالك وقائع أخرى من هذا النوع معروفة لدينا. ومن ناحية أخرى، توجد ظواهر يمكن شرحها بواسطة النظرية الموجية لا بواسطة نظرية الكمّات. ويشكل انحناء الضوء حول العوائق مثلاً نموذجياً على ذلك. وأخيراً توجد ظواهر كالانتشار المستقيم للضوء مثلاً، يمكن تقديم تفسير لها بواسطة النظريتين على السواء: النظرية الموجية والنظرية الكمية.

ولكن ما هو الضوء في الحقيقة؟ هل هو موجة أم سيل من الفوتونات؟ وكنا طرحنا سابقاً سؤالاً مماثلاً وهو: هل الضوء موجة أم وابل من الجسيمات الضوئية؟ في ذلك الحين كان لدينا كل الأسباب للتخلي عن النظرية الجسيمية للضوء وقبول النظرية الموجية التي استوعبت كل الظواهر. أما الآن، فالمسألة معقدة أكثر ويبدو أنه من غير المحتمل القيام بوصف متماسك لظواهر الضوء إذا استخدمنا واحدة فقط من اللغتين المتاحتين أمامنا. إننا نرى أنفسنا في بعض الأحيان مرغمين على استخدام واحدة من النظريتين، وفي حالات أخرى نستخدم النظرية الثانية، كما نستطيع من وقت لآخر استعمال النظريتين معاً. وهكذا نجد أنفسنا أمام صعوبة من نوع جديد إذ أنه توجد لدينا صورتان متناقضتان للواقع، فإذا أخذنا كل صورة منهما على حدة، فهي غير قادرة على تفسير جميع الظواهر الضوئية بشكل كامل، بينما إذا أخذنا الصورتين معاً فإننا نتمكن من ذلك.

كيف يمكن مزج هاتين الصورتين؟ وكيف يمكن شرح هذين الوجهين المختلفتين جداً للضوء؟ ليس من السهل علينا تقديم تفسير لهذه الصعوبة الجديدة. فها نحن مجدداً أمام مسألة أساسية.

لنقبل في الوقت الحاضر، نظرية فوتونات الضوء ونحاول بواسطتها فهم الوقائع التي تمّ شرحها حتى الآن بواسطة النظرية الموجية. وبهذه الطريقة سوف نتمكن من إبراز الصعوبات التي تبين للوهلة الأولى بأن هاتين النظريتين لا يمكن التوفيق بينهما.

نذكّر بأن الشعاع الضوئي المتجانس إذا مرّ خلال ثقب صغير فإنه ينتج حلقات نيّرة ومظلمة. فكيف يمكننا تفسير هذه الظاهرة عن طريق نظرية الكمّات الضوئية إذا وضعنا جانباً النظرية الموجية؟ يمر فوتون من خلال الثقب. ويمكننا أن نتوقع أن تكون الشاشة نيّرة إذا مرّ الفوتون ومظلمةً إذا لم يمر. وعوضاً عن ذلك فإننا في الواقع نجد حلقات نيّرة ومظلمة بشكل تناوبي على الشاشة. نستطيع تقديم شرح لذلك على الشكل التالي: يمكن أن يكون هناك تفاعل ما بين حافة الثقب والفوتون، وهذا التفاعل يعتبر مسؤولاً عن ظهور حلقات الحيود. إن ذلك غير كافٍ لإعطاء تفسير

مقبول، ونرى فيه على الأكثر مشروع تفسير يجعلنا نأمل بأننا سوف نتوصل في المستقبل إلى شرح الحيود بواسطة التفاعل بين المادة والفوتونات.

ولكن حتى هذا الأمل الضعيف يضمحل عندما نتذكر بحثنا لتجربة أخرى. إذا أخذنا ثقبين، نرى أن الضوء المتجانس الذي يمر من خلالهما يُسقط على الشاشة أشرطة نيّرة ومظلمة بالتناوب. فكيف يمكن شرح هذه النتيجة عن طريق نظرية كمّات الضوء؟ يمكننا أن نفكر كالتالي: إن فوتوناً يمر من خلال أحد الثقبين لأنه إذا كان فوتون الضوء المتجانس يمثل جسيماً أولياً للضوء فمن الصعب التصور بأنه يمكن أن ينقسم ويمر من خلال الثقبين. ومن ثم فإن النتيجة يجب أن تكون مماثلة لنتيجة الحالة الأولى، أي حلقات نيّرة ومظلمة لا أشرطة. فكيف يغيّر وجود ثقب آخر النتيجة تماماً؟ يظهر أن الثقب الذي لا يمر من خلاله الفوتون يغير الحلقات إلى أشرطة حتى ولو كان بعيداً عن الثقب الأول. وإذا كان الفوتون يتصرف كالجسيم في الفيزياء التقليدية، فيجب أن يمر من خلال أحد هذين الثقبين. ولكن في هذه الحالة لا تبدو ظواهر الحيود مفهوم على الإطلاق.

يرغمنا العلم على ابتكار أفكار ونظريات جديدة تهدف إلى تقويض جدار التناقضات الذي يسد الطريق على التقدم العلمي. وكل الأفكار الهامة في العلم ولدت من الصراع المأساوي بين الواقع ومحاولاتنا لفهمه. هنا نجد أنفسنا مجدداً أمام مسألة يتطلب حلّها وجود مبادئ جديدة. وقبل أن نحاول عرض مساعي الفيزياء الحديثة لشرح التناقض بين الوجه الكمّي والوجه الموجي للضوء. نريد أن نبرهن أننا سنلاقي نفس الصعوبة تماماً عندما نتعامل مع كمّات المادة بدلاً من كمّات الضوء.

الأطياف الضوئية:

لقد عرفنا سابقاً أن المادة كلها مركبة من بضعة أنواع من الجسيمات، وأن أولى الجسيمات الأولية التي تمّ اكتشافها كانت الإلكترونات، ولكن هذه الإلكترونات هي أيضاً الكمّات الأولية للكهرباء السالبة. وتعلمنا بالإضافة إلى ذلك، أن بعض الظواهر ترغمنا على الافتراض بأن الضوء مؤلف من كمّات أولية ضوئية، تختلف باختلاف

طول الموجات الضوئية. وقبل الذهاب بعيداً، علينا أن نناقش بعض الظواهر الفيزيائية التي تلعب المادة والإشعاع دوراً أساسياً فيها.

ترسل الشمس إشعاعاً يمكن تحليله بواسطة منشور إلى مركّباته. وهكذا نحصل على الطيف الشمسي الكامل، حيث تتمثل كل أطوال الموجات التي تتدرج بين طرفي الطيف المرئي. لنأخذ مثلاً آخر، لقد ذكرنا سابقاً أن الصوديوم يبعث عندما يكون في حالة وهّاجة، ضوءاً متجانساً له لون واحد وطول موجي واحد. وإذا وضعنا الصوديوم الوهاج أمام منشور نرى شريطاً أصفر اللون يخرج منه. وبشكل عام، إذا قمنا بوضع جسم مشع أمام منشور فإن الضوء الذي يرسله هذا الجسم يتحلل إلى مركباته، مما يكشف لنا عن الطيف المميز للجسم المرسِل.

إن تفريغ شحنة كهربائية في أنبوب يحتوي على غاز ينتج عنه مصدر للضوء، كما نرى ذلك في مصابيح النيون التي تستخدم في الإعلانات الضوئية. فإذا قمنا بوضع مثل هذا الأنبوب أمام كاشف الطيف، تلك الآلة التي تعمل مثل المنشور ولكن بدقة وحساسية أكبر بكثير، فإنه سوف يفكك الضوء إلى مركباته، أي يقوم بتحليله. ويعطي ضوء الشمس المشاهد من خلال كاشف الطيف طيفاً مستمراً تتمثل فيه أطوال الموجات كلها. لكن إذا كان مصدر الضوء غازاً يمر فيه تيار كهربائي، يصبح للطيف صفة أخرى. وعوضاً عن الطيف الشمسي المتعدد الألوان والمستمر نرى ظهور أشرطة نيّرة ومنفصلة عن بعضها البعض على خلفية سوداء مستمرة. وكل شريط، إذا كان ضيقاً جداً، يقابل لوناً معيناً، أو بلغة النظرية الموجية، يقابل طول موجة معين. فمثلاً إذا وجد عشرون شريطاً مرئياً في الطيف، فإنّ كلاً منها سوف يستدل عليه بواحد من الأعداد العشرين التي تعبر عن أطوال الموجات المقابلة. إن الأبخرة العائدة لعناصر مادية مختلفة لها منظومات مختلفة من الأشرطة، وبالتالي عندها توافقيات combinations مختلفة من الأعداد التي تدل على أطوال الموجات التي تؤلف الطيف المنبعث منها. ولا يوجد عنصران لهما منظومتان متماثلتان من الأشرطة في طيفيهما الخاصين بهما، مثلما لا يوجد شخصان لهما بصمات متماثلة تماماً. وعندما تمّ وضع بيان بهذه الأشرطة من قبل الفيزيائيين، اتضح وجود قوانين تربط فيما بينها، وصار

من الممكن أن تحل صيغة رياضية بسيطة محل بعض أعمدة الأعداد التي تبدو غير متصلة والتي تعبر عن أطوال الموجات المختلفة.

إن كل الذي قلناه يمكننا الآن ترجمته إلى لغة الفوتونات. فالأشرطة توازي بعض أطوال الموجات المحددة، أو بعبارة أخرى، توازي فوتونات ذات طاقة معينة. وبالتالي فإن الغاز المضيء لا يرسل فوتونات من كل الطاقات الممكنة، بل فقط فوتونات خاصة بمادته. وهنا نرى مجدداً أن الواقع يقوم بتقييد تنوّع الإمكانات.

إن ذرات عنصر معين كالهيدروجين مثلاً، ترسل فوتونات من طاقة معينة فحسب. فلا يسمح إلا بإصدار كمّات طاقوية محددة وحظر كل الطاقات الأخرى. من أجل التبسيط، دعونا نتصور أن عنصراً معيناً لا يرسل إلاّ شريطاً واحداً، أي فوتونات من طاقة محددة تماماً. عندها تكون ذرته أكثر غنى بالطاقة قبل إصدار الإشعاع وأكثر فقراً بعده. وانطلاقاً من مبدأ الطاقة نستنتج بالضرورة أن مستوى الطاقة energy level يكون أعلى قبل الإصدار وأدنى بعده، وأن الفرق بين المستويين يجب أن يساوي طاقة الفوتون المرسل. وهكذا يمكن التعبير بشكل مختلف عن إصدار ذرة عنصر محدد إشعاعاً له طول موجي واحد، أي فوتونات من طاقة معينة فقط، حيث يمكننا القول إن هناك مستويان فقط للطاقة مسموح بهما في ذرة في هذا العنصر، وأن إصدار فوتون يعني انتقال الذرة من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى أدنى.

ولكننا نرى عامة أكثر من شريط واحد يظهر في أطياف العناصر، وأن الفوتونات المرسلة لها طاقات عديدة وليس طاقة واحدة فقط. أو بعبارة أخرى، علينا أن نفترض بأن الكثير من مستويات الطاقة موجود في الذرة وأن إصدار فوتون يعني انتقال الذرة من مستوى طاقوي أعلى إلى مستوى طاقوي أدنى. المهم في الأمر عدم السماح بوجود كل مستويات الطاقة، لأنه لا تظهر في طيف العنصر جميع أطوال الموجات الممكنة، أو كل طاقات الفوتونات الممكنة. وبدل أن نقول إنه يوجد في طيف كل ذرة بعض الأشرطة المحددة، أي بعض أطوال الموجات المحددة، نستطيع القول إن كل ذرة لديها بعض مستويات الطاقة المحددة، وأن إصدار الكمّات الضوئية يترافق مع انتقال الذرة

من مستوى طاقوي معين إلى مستوى آخر. ولا تكـون مسـتويات الطاقـة بشـكل عـام مستمرة ولكن متقطعة، ومرة أخرى نرى أن الواقع يقيد الإمكانات ويجعلها محدودة.

لقد كان "بور Bohr" أول من بيّن سبب ظهور هذه الأشرطة بالذات وليس غيرهـا في الطيف. فنظريته التي صاغها منذ 25 سـنة(*) ترسـم صـورة للـذرة تسـمح بحسـاب أطياف العناصر، على الأقل في الحالات البسيطة، وتبين بأن الأعداد التي تظهـر وكأنـه لا معنى لها ولا ترابط بينها، تشكل على ضوء هذه النظرية مجموعة متماسكة.

تشكل نظرية بور هذه مرحلة وسيطة نحو إيجاد نظرية أكثر شمولاً وعمقـاً تسـمى نظرية الميكانيكا الموجية أو ميكانيك الكمّ. وإننا ننوي أن نعرض الأفكار الرئيسية لهـذه النظرية في الصفحات الأخيرة من هذا الكتاب. وقبل ذلـك علينـا ذكـر نتيجـة نظريـة وتجريبية من نوع خاص.

يبدأ طيفنا المرئي بطول موجة اللون البنفسجي وينتهي بطول موجة اللون الأحمر، أو بعبارة أخرى، إن طاقات الفوتونات في الطيف المرئي هي دائماً محصورة بين حدّين: طاقة فوتونات اللون البنفسجي وطاقة فوتونات اللـون الأحمـر. وهـذا التقييـد هـو في الواقع عائد إلى العين البشرية. وإذا كان الفرق بين بعض مستويات الطاقة كبيراً بما فيه الكفاية فإن فوتوناً فوق بنفسجي ultraviolet سينبعث ويعطي شريطاً يتخطـى حـدود الطيف المرئي. ولا يمكن للعين المجردة أن تكشف عن وجوده، بل يجب استعمال لوحة التصوير لذلك.

تتألف الأشعة السينية X – rays أيضاً من فوتونـات ذات طاقـة أكـبر بكـثير مـن طاقات الضوء المرئي. أو بعبارة أخرى، إن أطوال موجاتها هي آلاف المرات أصغر من أطوال موجات الضوء المرئي.

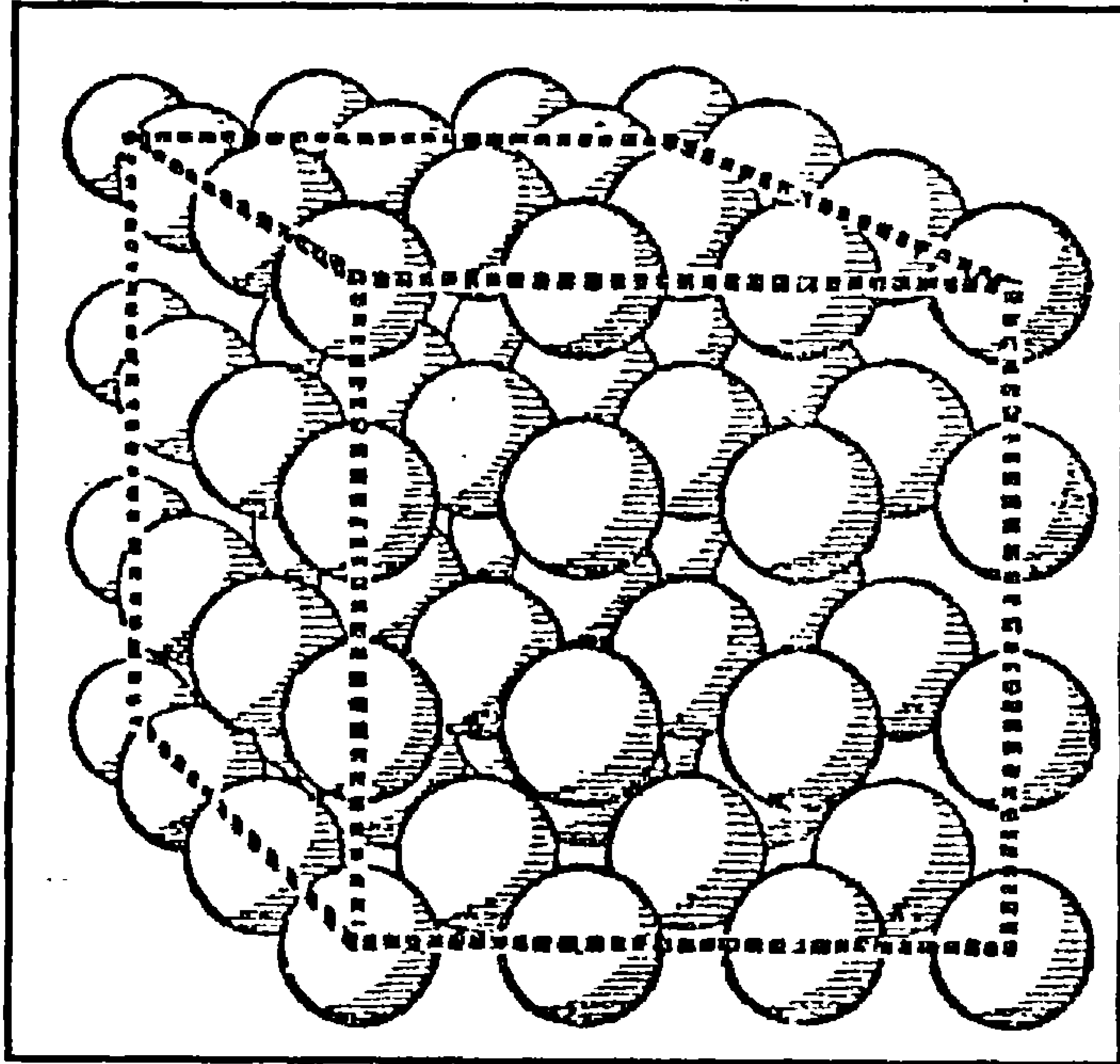
ولكن هل بالإمكان تحديد أطوال موجات بهذا الصغر تجريبيـاً؟ لقـد كـان ذلـك صعباً بالنسبة للضوء العادي، إذ كان علينا استخدام عوائق وفتحات صغيرة. فـالثقبين

(*) هذا الكتاب صدر للمرة الأولى عام 1938 – المترجم.

المتقاربين جداً واللذين يظهران انعراج الضوء العادي، يجب أن يكونا أصغر وأقرب، أحدهما إلى الآخر، بآلاف المرات ليظهرا انعراج الأشعة السينية.

كيف يمكننا إذن القيام بقياس أطوال موجات هذه الأشعة؟ إن الطبيعة ذاتها تقدم لنا العون في ذلك.

إن البلورة هي تكتل للذرات الملزوزة في مخطط تام الانتظام. ويقدم الرسم نموذجاً بسيطاً عن بنية البلورة. وعوضاً عن الفتحات الصغيرة لدينا عوائق صغيرة جداً مكونة من ذرات العنصر القريبة جداً من بعضها البعض بانتظام مطلق. إن المسافات بين الذرات هي، حسب نظرية بنية البلورات، صغيرة جداً لدرجة يمكن أن نأمل باستخدامها لإيضاح عملية انعراج الأشعة السينية. لقد برهنت التجربة أنه من الممكن إظهار انعراج الأشعة السينية بواسطة هذه العوائق المرصوصة على بعضها البعض والمرتبة بشكل منظم في فضاء ثلاثي الأبعاد.



شكل 2

لنفترض الآن أن إشعاعاً سينياً يسقط على بلورة ويجتازها، ثم يتم تسجيله على لوحة تصويرية تبين نمط الانعراج. لقد استخدمت طرق متنوعة لدراسة أطياف الأشعة السينية وتمّ استخراج المعطيات المتعلقة بأطوال الموجات من نمط الانعراج. وما نقوله هنا في كلمات معدودة يملأ مجلدات ضخمة لو أردنا عرض كل التفاصيل النظرية والتجريبية.

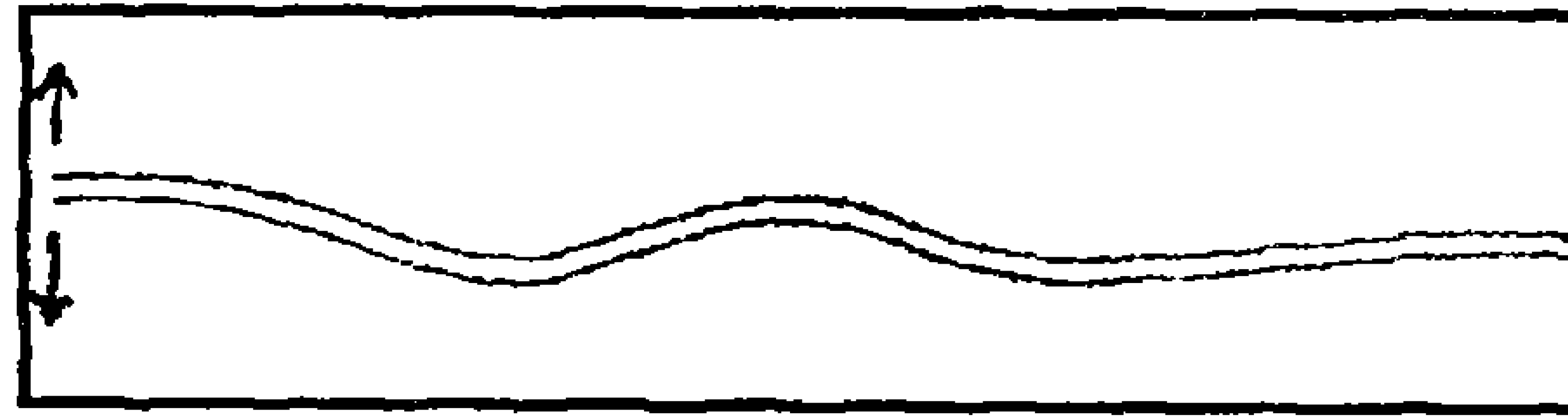
موجات المادة:

كيف يمكن شرح الواقع الذي يقول إن بعض أطوال الموجات المميّزة فقط هي التي تظهر في أطياف العناصر.

غالباً ما يتحقق تقدم هام في الفيزياء عن طريق إقامة التشابه بين ظواهر لا يوجد بينها علاقة في الظاهر. وقد رأينا عدة مرات في هذه الصفحات كيف أن الأفكار التي تولد وتنمو في فرع من فروع العلم يجري فيما بعد تطبيقها بنجاح في فرع آخر. ويقدم تطور المفهوم الميكانيكي ومفهوم الحقل العديد من الأمثلة على ذلك. فإقامة صلة بين المسائل المحلولة وغير المحلولة يمكن أن يلقي ضوءاً جديداً على الصعوبات التي نصادفها ويوحي إلينا بأفكار جديدة. ومن السهل إيجاد تشابه سطحي لا يعبر في الواقع عن أي شيء، إلاّ أن اكتشاف بعض السمات الأساسية المشتركة والمختبئة تحت ستار من الاختلافات الظاهرية وبناء نظرية جديدة ناجمة على أساسها يعتبر إنجازاً خلاّقاً. وما تطوير الميكانيكيا الموجية، الذي بدأ على يدي "دوبرويل de Broglie" و"شرودنغر Schrodinger"، منذ خمسة عشر سنة، إلا مثالاً نموذجياً عن وضع نظرية ناجحة بواسطة تشابه "عميق وسعيد".

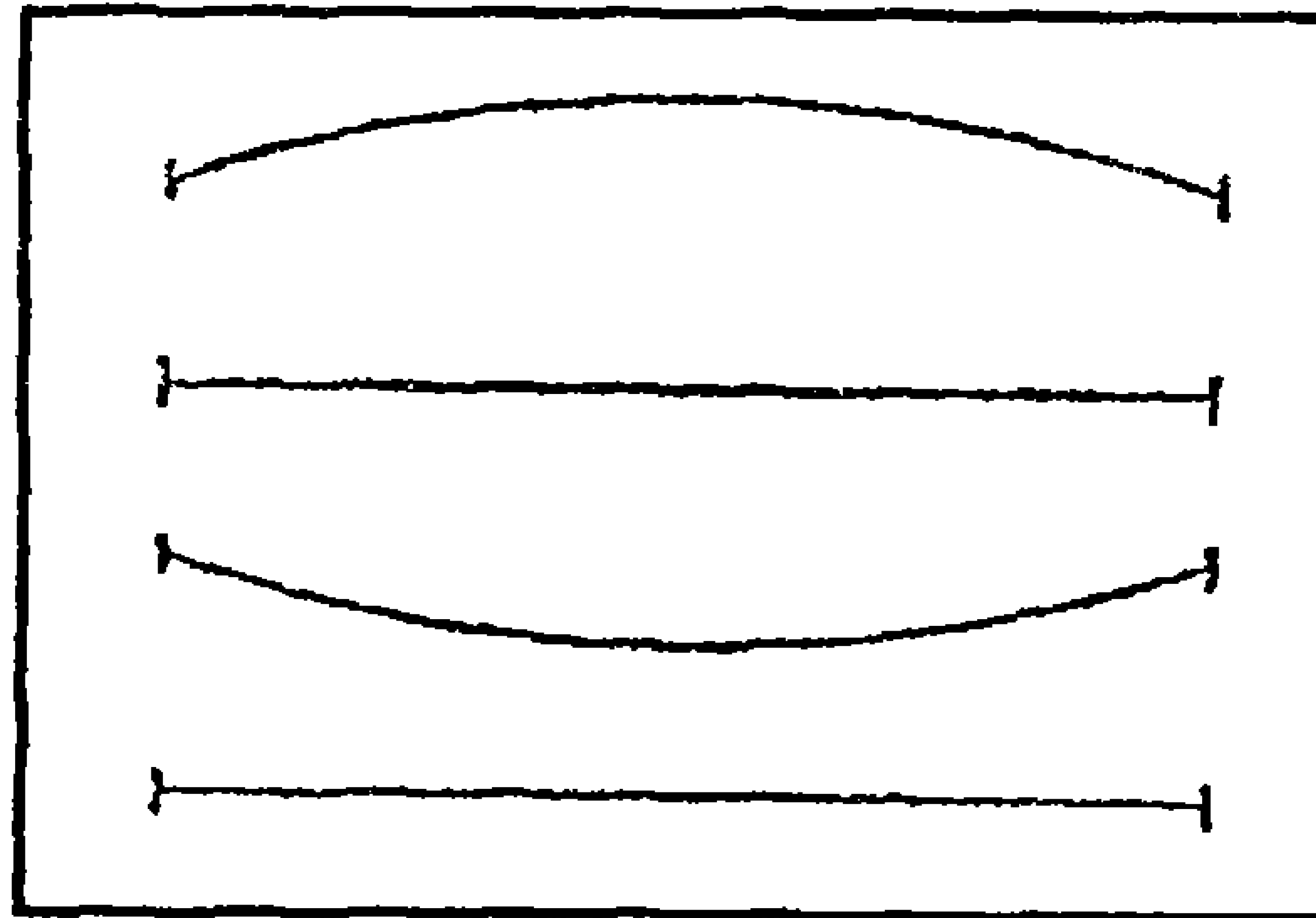
إن نقطة الانطلاق بالنسبة لنا ستكون دراسة مثل تقليدي لا علاقة له بالفيزياء الحديثة: نمسك بيدنا طرف أنبوب مطاطي طويل أو طرف نابض spring طويل ونقوم بتحريكه نحو الأعلى والأسفل بشكل متواتر بحيث يهتز طرفه. تنشأ عن ذلك، كما رأينا في أمثلة أخرى متعددة، موجة تنتشر على طول الأنبوب بسرعة معينة. ولو تخيلنا أن الأنبوب لا متناهٍ في الطول فإن الأمواج التي تنطلق سوف تتابع انتشارها إلا ما لا نهاية بدون أية عوائق.

لنحاول درس حالة أخرى، حيث نأخذ نفس الأنبوب ونثبته من طرفيه، أو يمكننا إذا أردنا أن نستعين بوتر الكمان. ماذا سيحدث إذا قمنا بخلق موجة عند أحد طرفي الأنبوب المطاطي أو الوتر؟ تبدأ هذه الموجة في السريان كما كان الوضع في الحالة السابقة، ولكن سرعان ما تنعكس عند الطرف الآخر للأنبوب، ويصبح لدينا الآن موجتان: الأولى التي ولّدها الاهتزاز والثانية التي ولّدها الانعكاس، وتتحرك هاتان الموجتان في اتجاهين متعاكسين وتتداخلان. ولن يكون صعباً علينا متابعة تداخل الموجتين في اتجاهين متعاكسين وتتداخلان. ولن يكون صعباً علينا متابعة تداخل الموجتين واكتشاف موجة جديدة ناتجة عن تراكبهما تدعى الموجة المستقرة standing wave. إن كلمتي "مستقرة" و"موجة" تظهران وكأنهما متناقضتين، إلاّ أن جمعهما مبرر نتيجة تراكب الموجتين.



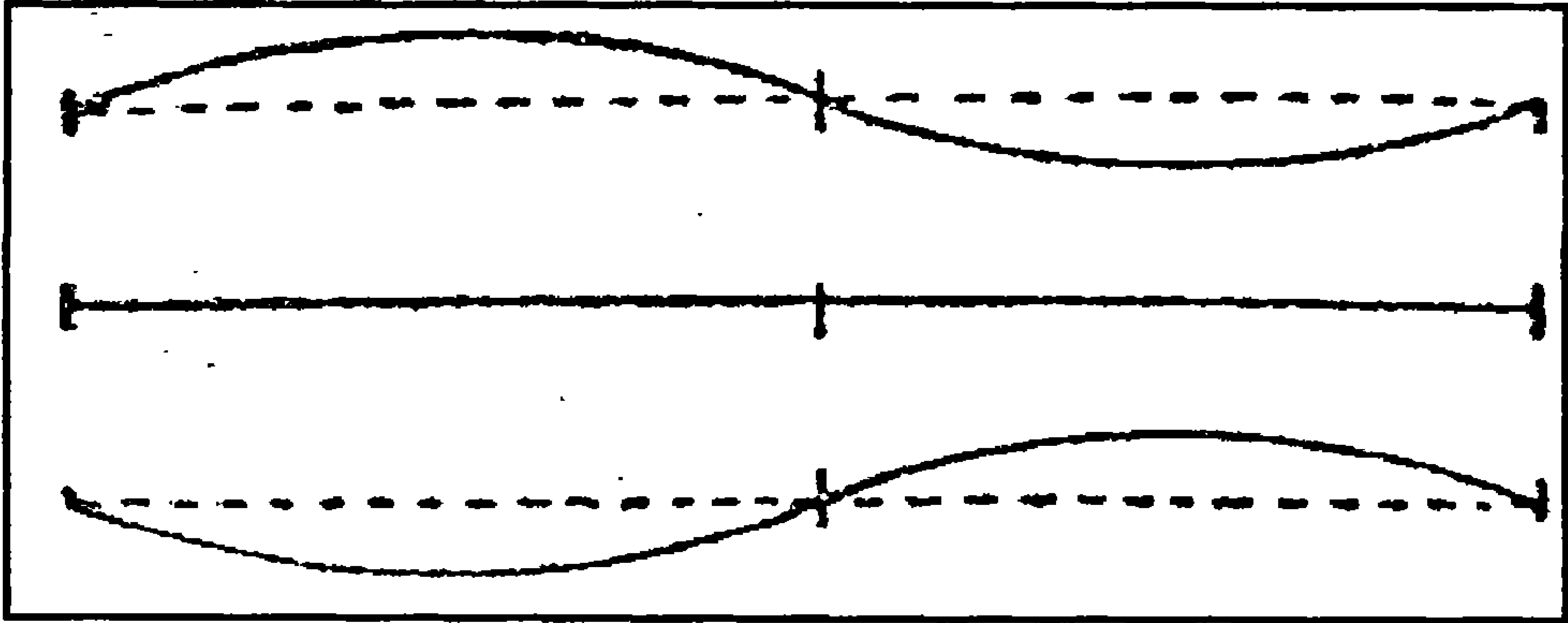
الشكل 3

إن أبسط مثل عن الموجة المستقرة هو حركة الوتر المثبت من طرفيه، فهي حركة متناوبة نحو الأعلى ونحو الأسفل كما يظهر في الرسم. وهذه الحركة هي نتاج تراكب موجتين تتحركان في اتجاهين متعاكسين. والسمة المميزة لهذه الحركة هو أن نقطتي الطرفين هما الثابتتان فقط، ونسميهما بالعقدتين nodes. فالموجة تمكث بين العقدتين، وجميع نقاط الوتر تبلغ بشكل متزامن القيمة العظمى والقيمة الصغرى للانحراف.



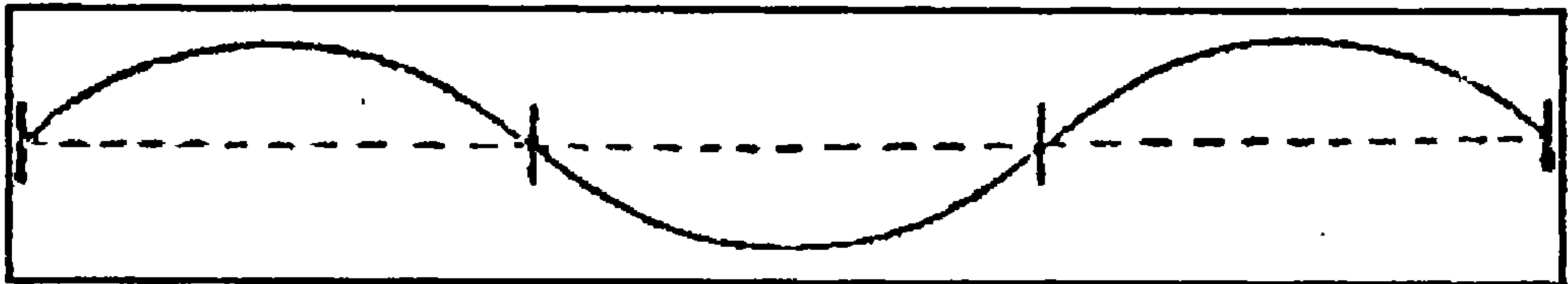
الشكل 4

ولكن هذا هو أبسط مثل عن الموجة المستقرة، فهنالك حالات حيث توجد ثلاث عقد مثلاً، واحدة من كل طرف وثالثة في الوسط، أي ثلاث نقاط تبقى دائماً في حالة سكون. وإلقاء نظرة على الرسم تبين أن طول الموجة في هذه الحالة سيكون نصف طول الموجة في حالة الوتر ذي العقدتين. كما توجد أيضاً موجات مستقرة لها أربع أو خمس عقد أو أكثر من ذلك. وطول الموجة يتوقف في كل حالة على عدد العقد الذي لا يمكن أن يكون إلاّ عدداً كاملاً integer ويتغير عن طريق القفز. فلا يوجد معنى للجملة التي تقول: "إن عدد العقد في موجة مستقرة هو 3.576".



الشكل 5

وهكذا لا يتغير طول الموجة إلاّ بشكل متقطع. وفي هذه المسألة التقليدية المطروحة هنا نجد الصفات المعروفة لنظرية الكمّات. إن الموجة المستقرة التي يصنعها



الشكل 6

لاعب الكمان هي في الواقع أكثر تعقيداً لأنها خليط من عدد كبير من الموجات التي لها عقدتان، أو ثلاث أو أربع أو خمس عقد أو أكثر، وبالتالي فهي مزيج من أطوال

موجية مختلفة. وباستطاعة الفيزياء أن تقوم بتحليل هذا الخليط وتبيان الموجات المستقرة البسيطة التي يتألف منها. أو إذا استعملنا مصطلحاتنا السابقة، يمكننا القول إن للوتر المهتز طيفاً، تماماً كالعنصر الذي يبعث إشعاعاً. وكما هي الحال بالنسبة لطيف العنصر، فإن بعض أطوال الموجات هي المقبولة وكل ما عداها ممنوع.

وبهذا نكون قد اكتشفنا بعض التشابه بين الوتر المهتز والذرة التي ترسل إشعاعاً. ومهما كان غريباً هذا التشابه، فإننا نريد أن نحصل منه على استنتاجات أخرى، لذلك نحاول أن نتابع هذه المقارنة التي اخترناها. تتألف ذرات كل عنصر من جسيمات أولية، تشكل الثقيلة منها نواة الذرة والخفيفة الإلكترونات. إن منظومة الجسيمات هذه تتصرف مثل آلة صوتية صغيرة تحدث موجات مستقرة.

ولكن الموجة المستقرة هي نتيجة تداخل موجتين، أو بشكل عام عدة موجات متحركة. وإذا كان هذا التشابه يحمل بعض الحقيقة، فإن بنية أبسط من بنية الذرة يجب أن تقابل حالة الموجة التي تنتشر. ولكن في عالمنا المادي، لا شيء يمكن أن يكون أبسط من الإلكترون الذي لا تفعل عليه أية قوة، أي الإلكترون الساكن أو المتحرك بانتظام. وهكذا نستطيع أن نتعرف على حلقة إضافية من سلسلة التشابهات: إلكترون في حركة منتظمة موجات ذات طول محدد. هذه هي الفكرة الجديدة والجريئة التي أدخلها دوبرويل.

لقد بيّنا سابقاً أنه توجد بعض الظواهر التي يكشف فيها الضوء عن صفته الموجية، كما توجد ظواهر أخرى يكشف فيها الضوء عن صفته الجسيمية. وبعد أن كنّا قد اعتدنا على فكرة أن الضوء هو موجة، دهشنا لاكتشافنا أنه في بعض الحالات، كما هو الوضع بالنسبة للعملية الكهرضوئية، ينصرف وكأنه سيل من الفوتونات. أما الآن وقد انعكس الوضع كلياً بالنسبة للإلكترونات، فقد تعودنا على فكرة أن الإلكترونات هي جسيمات، أي كمّات أولية كهربائية ومادية. وقد تم التحقق من شحنتها وكتلتها. فإذا كان هناك بعض الحقيقة في فكرة دوبرويل، فيجب أن توجد ظواهر تكشف فيها المادة عن صفتها الموجية. إن هذه النتيجة التي نتوصل إليها بمتابعة التشابه مع الموجات الصوتية تبدو للوهلة الأولى غريبة وغير مفهومة. فكيف أن

جسيماً متحركاً يمكن أن يكون له أية علاقة مع موجة؟ إنها ليست المرة الأولى التي نجد فيها أنفسنا أمام صعوبة من هذا النوع في الفيزياء. لقد واجهتنا نفس المسألة في مجال الظواهر الضوئية.

تلعب الأفكار الأساسية دوراً هاماً في تكوين النظرية الفيزيائية. والمؤلفات الفيزيائية ملأى بالصيغ الرياضية المعقدة، إلاّ أن الفكر والأفكار هي في أساس كل نظرية فيزيائية وليس الصيغ. فالأفكار ترتدي فيما بعد ثوب الصيغة الرياضية لنظرية كمية وتفسح المجال للمقارنة مع التجربة. وهذا ما يمكننا توضيحه إذا أخذنا كمثل المسألة التي تحظى باهتمامنا حالياً. إن التخمين الأساسي هو أن الإلكترون الذي يتحرك بانتظام يتصرف من خلال بعض الظواهر كموجة. لنفترض أن إلكتروناً، أو وابلاً من الإلكترونات لها جميعها نفس السرعة تنشط في حركة منتظمة، وأننا نعرف كتلة كل إلكترون بمفرده وسرعته وشحنته. وإذا أردنا أن نقرن بشكل معين مفهوم الموجة بإلكترون أو إلكترونات تتحرك بانتظام، يكون سؤالنا الأول: ما هو طول هذه الموجة؟ إنه سؤال كمّي، ويجب بناء نظرية كمية للإجابة عنه، وهذا ليس بالأمر الصعب. إن البساطة الرياضية لعمل دوبرويل الذي يقدم جواباً عن هذا السؤال هي بالواقع شيء رائع. ففي الوقت الذي تم فيه هذا كانت التقنية الرياضية المستعملة في نظريات فيزيائية أخرى غامضة ومعقدة. لقد كانت الرياضيات المستخدمة في التعامل مع أمواج المادة بسيطة جداً، ولكن الأفكار الأساسية كانت عميقة وبعيدة الأثر.

لقد بيّنا بالنسبة للموجات الضوئية والفوتونات أن كل قولٍ مصاغ باللغة الموجبة يمكن ترجمته إلى لغة الفوتونات أو الجسيمات الضوئية. وهذا أيضاً يصح بالنسبة للموجات الإلكترونية. لقد تعرفنا سابقاً بالنسبة للإلكترونات المنتظمة الحركة على اللغة الجسيمية، ولكن كل قول معبر عنه باللغة الجسيمية يمكن ترجمته إلى اللغة الموجية، تماماً كما هو الوضع بالنسبة للفوتونات. هنالك خيطان للحل أرسيا قواعد هذه الترجمة. وأول هذين الخيطين عملية التشابه بين الأمواج الضوئية والأمواج الإلكترونية، أو بين الفوتونات والإلكترونات. وسنبذل جهدنا لاستعمال نفس طريقة الترجمة بالنسبة للمادة وللضوء على حدٍ سواء. وقدمت لنا نظرية النسبية الخاصة خيط

الحل الثاني: إن قوانين الطبيعة يجب أن تكون لا متغيرة في تحويل لونتز وليس في التحويل التقليدي. وهذان الخيطان يسمحان معاً بتحديد طول الموجة العائدة للإلكترون المتحرك. ويتبين من النظرية أن إلكتروناً يتحرك بسرعة 10000 ميل بالثانية مثلاً، له طول موجي يمكن حسابه بسهولة وينتمي إلى نفس المنطقة التي تنتمي إليها أطوال موجات الأشعة السينية. ونستنتج من ذلك أنه إذا كان يمكن الكشف عن الصفة الموجية للمادة، فيجب أن يتم ذلك بنهج تجريبي مشابه للذي استخدم بالنسبة للأشعة السينية.

لنتخيل شعاعاً إلكترونياً يتحرك بشكل منتظم وبسرعة معينة. أو إذا استعملنا المصطلح الموجي، لنتخيل موجة إلكترونية متجانسة، ونفترض أن هذه الموجة تسقط على بلورة رقيقة جداً تلعب دور مُحزّزة انعراج diffraction grating. تكون المسافات بين العوائق الحيودية في البلورة صغيرة لدرجة أنها تسبب حيود الأشعة السينية. ويمكننا انتظار نتيجة مماثلة فيما يتعلق بالموجات الإلكترونية التي لها طول موجي من نفس القيمة، حيث يتعين على لوحة التصوير أن تسجل حيود هذه الموجات الإلكترونية التي تمر خلال البلورة الرقيقة. وبالفعل فإن التجربة تبين هذه الظاهرة لحيود الموجات الإلكترونية، مما يعتبر بدون أدنى شك إحدى الإنجازات الكبرى للنظرية. فالتشابه بين حيود الموجة الإلكترونية وموجة الشعاع السيني واضح وبيّن. ومن ناحية أخرى نعلم أن بعض الصور تسمح لنا بتحديد أطوال موجات الأشعة السينية، وهذا أيضاً يصح بالنسبة للموجات الإلكترونية. فصورة الحيود تُعطي طول موجة المادة ويؤكد التوافق الكمّي التام بين النظرية والتجربة بشكل قوي سلسلة المبررات التي تقدمنا بها.

بهذه النتيجة تكون صعوباتنا السابقة قد توسعت وتعمّقت. ويمكننا توضيح ذلك بإعطاء مثل مشابه للمثل الذي أعطيناه بالنسبة للموجة الضوئية. فالإلكترون المنطلق نحو ثقب صغير جداً ينحني كالموجة الضوئية، وتظهر الحلقات النيّرة والمظلمة بالتناوب على السطح التصويري. ويمكننا أن نأمل بشرح هذه الظاهرة عن طريق التفاعل ما بين الإلكترون وحافة الثقب، رغم أن مثل هذا الشرح لا يبدو وارداً. ولكن ما الذي يجري في حالة الثقبين؟ تظهر أشرطة بدلاً من الحلقات. كيف من الممكن أن يغير وجود ثقب

آخر النتيجة بشكل تام؟ فالإلكترون غير قابل للتجزئة ويتوجب عليه أن يمر من خلال ثقب واحد، ومع ذلك كيف له أن يعرف بوجود ثقب آخر على مسافة صغيرة من الثقب الأول؟

لقد طرحنا أسئلة في السابق مثل: ما هو الضوء؟ هل هو سيل من الجسيمات أم موجة؟ ونتساءل الآن: ما هي المادة؟ وما هو الإلكترون؟ هل هو جسيم أم موجة؟ إن الإلكترون يسلك سلوك الجسيم عندما يتحرك في حقل كهربائي ومغنطيسي خارجي، ويسلك سلوك الموجة عندما تتسبب البلورة في حيوده. وقد واجهتنا مع الكمّات الأولية للمادة نفس الصعوبة التي صادفتنا في حالة الكمّات الضوئية. إن أحد الأسئلة الرئيسية التي يطرحها التقدم العلمي الجديد هو معرفة كيفية التوفيق بين المفهومين المتناقضين للمادة وللموجة. إنها من الصعوبات الأساسية التي تؤدي متى تمت صياغتها إلى التقدم العلمي على المدى الطويل. لقد حاولت الفيزياء أن تقدم حلاً لهذه المسألة، ولكن المستقبل هو الذي سيقرر ما إذا كان الحل المقترح دائماً أم مؤقتاً.

موجات الاحتمال:

إذا كنا، حسب الميكانيكا التقليدية، نعرف موضع وسرعة نقطة مادية معينة وكذلك القوى التي تفعل عليها، يكون باستطاعتنا التنبؤ بمسارها المستقبلي كله. فالعبارة التي تقول: "إن النقطة المادية لها هذا الموضع أو ذاك، وتتحرك بهذه السرعة أو تلك في هذه اللحظة أو تلك" لها معنى محدد في الميكانيكا التقليدية. وإذا فقد هذا القول معناه تفشل حجتنا للتنبؤ بالمسار المستقبلي.

في بداية القرن التاسع عشر أراد العلماء أن تقتصر الفيزياء كلها على قوى بسيطة تؤثر على جسيمات مادية تحتل مواقع معينة وتتحرك بسرعات محددة في لحظة معينة. لنتذكر كيف وصفنا الحركة عندما بحثنا الميكانيكا في بداية رحلتنا في عالم المسائل الفيزيائية. لقد أشرنا إلى نقاط على طول المسار المحدد تدل على اتجاه السرعة ومقدارها في هذه النقاط. وكان ذلك بسيطاً ومقنعاً. إلاّ أنه لا يمكن اتباع نفس النهج بالنسبة للكمّات الأولية للمادة، أي الإلكترونات، أو بالنسبة لكمّات الطاقة، أي الفوتونات. ولا نستطيع تمثيل مسيرة الفوتون أو الإلكترون بالطريقة ذاتها التي مثّلنا الحركة فيها في

الميكانيكا التقليدية. ويبين مثال الثقبين ذلك بوضوح، حيث يظهر كل من الإلكترون والفوتون وكأنه يمر من خلال الثقبين. إنه من غير الممكن شرح النتيجة إذا قمنا بتمثيل مسار الإلكترون والفوتون بالطريقة التقليدية القديمة.

علينا بالطبع افتراض وجود أفعال أولية كمرور الإلكترونات والفوتونات من خلال الثقوب، ولا يجوز الشك في وجود الكمّات الأولية للمادة والطاقة. ولكن لا يمكن صياغة القوانين الأولية لتحديد مواقع وسرعات هذه الكمّات بالطريقة البسيطة المستعملة في الميكانيكا التقليدية.

لذلك سنقوم باتباع نهج مختلف. دعونا نكرر باستمرار نفس العمليات الأولية. ونرسل الإلكترونات الواحدة بعد الأخرى في اتجاه الثقوب. وقد اخترنا هنا كلمة "الكترون" لتوضيح الأفكار، إلاّ أن حجتنا تنطبق أيضاً على الفوتونات.

في معظم الأحيان نكرر نفس التجربة بدقة وبنفس الطريقة. وتتحرك جميع الإلكترونات بنفس السرعة في اتجاه الثقبين. ولا حاجة بنا إلى القول بأن هذه التجربة هي مثالية ولا يمكن تنفيذها فعلياً، مع أنه يمكن تصورها بسهولة. لا نستطيع إطلاق فوتونات أو إلكترونات منعزلة وفي لحظات معينة كما نطلق رصاصات البندقية.

إن نتيجة التجارب المتكررة يجب أن تكون مجدداً حلقات نيّرة ومظلمة في حالة الثقب الواحد، وأشرطة نيّرة ومظلمة في حالة الثقبين. ولكن هناك فرق أساسي، فالنتيجة التجريبية لم تكن مفهومة في حالة الإلكترون الفردي. إلاّ أنه يمكن فهمها بسهولة أكثر إذا أعيدت التجربة عدة مرات. ونستطيع الآن القول إنه تظهر لدينا أشرطة نيّرة في المكان الذي يسقط فيه الكثير من الإلكترونات، وتصبح هذه الأشرطة معتمة أكثر في المكان الذي يسقط فيه عدد أقل من الإلكترونات. أما المكان المظلم تماماً فهو حيث لا يسقط فيه أي إلكترون. ليس مسموحاً لنا بالطبع الافتراض بأن جميع الإلكترونات تمر من خلال أحد الثقبين، ولو أن الأمر كذلك لما كنا لاحظنا أي فرق عندما نغطي الثقب الآخر. لكننا نعرف مسبقاً أنه عندما نقوم بتغطية الثقب الثاني يظهر الفرق واضحاً. وبما أن الجسيم الواحد هو غير قابل للانقسام فلا يمكننا تصور أنه يمر من خلال الثقبين. ويدلنا تكرار التجربة عدة مرات على مخرج آخر، وهو أن

بعض الإلكترونات يمكنها أن تمر من خلال الثقب الأول والبعض الآخر من خلال الثقب الثاني. ونحن لا نعرف كيف تقوم الإلكترونات بشكل إفرادي بالاختيار بين الثقبين. ولكن النتيجة الواضحة من هذه التجارب المتكررة هي أن الثقبين يستخدمان لمرور الإلكترونات من المنبع إلى الشاشة. وإذا حددنا فقط ماذا يحصل لحشد الإلكترونات عندما نقوم بتكرار التجربة دون الاهتمام بالسلوك الفردي للجسيمات، يصبح الفرق بين صورة الحلقات وصورة الأشرطة مفهوماً لدينا. لقد ولّد بحث سلسلة التجارب فكرة جديدة، ألا وهو أن هناك جمع يتصرف فيه الأفراد بشكل لا يمكن التنبؤ بالنتيجة النهائية التي هي ظهور الأشرطة النيّرة والمظلمة على الشاشة.

دعونا نترك جانباً فيزياء الكمّ في الوقت الحالي.

لقد رأينا في الفيزياء التقليدية أنه إذا كنا نعرض موضع وسرعة نقطة مادية في لحظة معينة وكذلك القوى التي تفعل عليها، فإننا نستطيع أن نتنبأ بمسارها المستقبلي. ورأينا أيضاً كيف تمّ تطبيق المفهوم الميكانيكي على النظرية الحركية للمادة. ولكن تعليلنا أنشأ فكرة جديدة في هذه النظرية. وسوف يكون استيعاب هذه الفكرة مفيداً في فهم الحجج اللاحقة.

لنأخذ وعاء يحتوي على غاز، فإذا حاولنا تتبع حركة كل جسيم يجب أن نبدأ أولاً بإيجاد الحالات الابتدائية للجسيمات، أي المواقع والسرعات الابتدائية لجميع الجسيمات. وإذا افترضنا أن ذلك ممكن، فحياة إنسان بكاملها لا تفي لتحقيق هذا الغرض نظراً لعدد الجسيمات الضخم التي يجب درسها. وإذا حاولنا فيما بعد استخدام الطرق المعروفة في الميكانيكا التقليدية لحساب المواقع النهائية للجسيمات فإننا سوف نصادف صعوبات لا يمكن حلّها. ويمكن من حيث المبدأ استعمال الطريقة التي نستخدمها في وصف حركة الكواكب، إلاّ أنه لن يكون لها أية فائدة عملياً، ويجب أن نخلي المكان للطريقة الإحصائية method of statistics التي تعفينا من معرفة الحالات الابتدائية بدقة. عندها تكون معلوماتنا أقل حول وضع المنظومة، وبالتالي نكون أقل قدرة على الجزم بأي شيء فيما يتعلق بماضيها أو مستقبلها. ونصبح غير مبالين بمصير الجسيمات الغازية الفردية لأن مشكلتنا هي من نوع آخر. فمثلاً نحن لن نسأل: "ما هي

سرعة كل جسيم في هذه اللحظة؟" ولكننا سنسأل: "كم هو عدد الجسيمات التي تتراوح سرعتها ما بين 1000 و 1100 قدم في الثانية؟" ولا يهمنا أبداً أمر الأفراد. إن ما نحاول تحديده هو القيم المتوسطة التي تميز المجموعة بأكملها، من الواضح أن الطريقة الإحصائية للتعليل لا تكون مجدية إلاّ إذا كانت المنظومة مؤلفة من عدد كبير من الأفراد.

وعندما نطبق الطريقة الإحصائية فإننا لا نستطيع التنبؤ بسلوك الفرد ضمن المجموع، بل نستطيع فقط تخمين التنبؤ بفرصة احتمال probability سلوكه بطريقة معينة. فإذا أنبأتنا قوانيننا الإحصائية بأن ثلث الجسيمات له سرعة تتراوح ما بين 1000 و 1100 قدم في الثانية، فهذا يعني أنه إذا كررنا مراقبتنا للعديد من الجسيمات فإننا سوف نحصل عملياً على هذا المعدل، أو بعبارة أخرى فإن احتمال أن نجد جسيماً يتمتع بسرعة ضمن هذين الحدين يساوي الثلث.

ومثل ذلك، فإن معرفة معدل الولادة في بلدٍ كبير لا يعني أبداً أننا نعرف أن عائلة ما قد رزقت بولد، بل يعني أننا نعرف النتائج الإحصائية حيث الهويات الشخصية لا دور لها.

وإذا لاحظنا لوحات التسجيل لعدد كبير من السيارات، سوف نكتشف بسرعة أن ثلث هذه الأرقام هو من النوع الذي يُقسم على 3، ولكننا لا نستطيع التنبؤ بأن السيارة التي ستمر بعد لحظة هي من هذه الفئة. إن القوانين الإحصائية لا تطبَّق إلاّ على الجموع الضخمة فحسب، لا على الأعضاء المنفردين.

يمكننا الآن العودة إلى مسألة الكمّات.

إن قوانين الفيزياء الكمّية لها صفة إحصائية. وهذا يعني أنها لا تتعلق بمنظومة منفردة بل بمجموعة من المنظومات المتشابهة، ولا يمكن التحقّق منها بقياس منظومة منفردة بل بالقيام بسلسلة من القياسات المتكررة.

إن التفكّك الإشعاعي هو إحدى الظواهر العديدة التي تحاول الفيزياء الكمية أن تصيغ لها قوانين تحكم التحوّلات المفاجئة من عنصر إلى آخر. ونحن نعلم مثلاً بأنه إذا أخذنا غراماً واحداً من الراديوم، فإن نصفه سوف يتفكك على مدى 1600 سنة

والنصف الآخر سيحفظ. ونستطيع أن نتنبأ بالعدد التقريبي للذرات التي ستتفكك في نصف الساعة القادم، إلاّ أنه لا نستطيع القول، حتى كوصف نظري، لماذا تتفكك هذه الذرات بالذات. وليس لدينا أي قدرة، استناداً إلى معارفنا الحالية، على تعيين الذرات المنفردة المحكوم عليها بالتفكك، إذ أن مصير كل ذرة لا يتوقف على عمرها. ولا يوجد أي أثر لقانون يحكم سلوك الذرات الفردي، ولا يمكننا إلاّ صياغة قوانين إحصائية، تلك القوانين التي تحكم مجموعات كبيرة من الذرات.

لنأخذ مثلاً آخر. إن الغاز المضيء لعنصر موضوع أمام كاشف الطيف يظهر أشرطة لها أطوال موجية محددة. فظهور مجموعة متقطعة من الأطوال الموجية المحددة هي من مميزات الظواهر الذرية التي يتكشف فيها وجود كمّات أولية. ولكن لهذه المسألة وجه آخر، إذ أن بعض الأشرطة في الطيف تظهر بشكل واضح بينما يكون البعض الآخر مشوشاً. إن الشريط الواضح يعني أنه تمّ إصدار عدد كبير نسبياً من الفوتونات التي تنتمي إلى طول موجي معين، والشريط المشوش يعني أنه تم إصدار عدد صغير نسبياً من الفوتونات التابعة لهذا الطول الموجي. وهنا أيضاً تقدم لنا النظرية مقولات ذات طبيعة إحصائية فقط. فكل شريط يقابل الانتقال من مستوى طاقوي أعلى إلى مستوى أدنى. والنظرية تحدثنا فقط عن احتمال كل من هذه الانتقالات الممكنة، ولا تقول لنا شيئاً عن الانتقال الفعلي لذرة منفردة. وتعمل النظرية بنجاح رائع لأن جميع هذه الظواهر تتعلق بمجموعات كبيرة وليس بأفراد منعزلين.

تبدو فيزياء الكمّ الجديدة أنها تشبه إلى حد ما النظرية الحركية للمادة، فكلاهما له طبيعة إحصائية ويتعامل مع منظومات مؤلفة من عدد كبير من الجسيمات. ولكن الواقع يختلف عن ذلك تماماً. ففي عملية التمثيل هذه، من المهم جداً أنت نتعرف على أوجه الاختلاف كما على أوجه التشابه. فالشبه بين النظرية الحركية للمادة وفيزياء الكمّ يكمن في صفتهما الإحصائية، فماذا عن الاختلافات؟

إذا أردنا أن نعرف عدد الرجال والنساء الذين يعيشون في مدينة وتزيد أعمارهم على عشرين سنة، يتوجب علينا الطلب إلى كل مواطن أن يملأ استمارة تحمل العبارات التالية: "مذكر" "مؤنث"، "العمر". وإذا افترضنا أن جميع الأجوبة صحيحة يمكننا

الحصول بواسطة العد والتصنيف على نتيجة ذات صفة إحصائية. إن الأسماء الفردية والعناوين الواردة في الاستمارة لا أهمية لها أبداً. لقد حصلنا على نظرتنا الإحصائية عن طريق معرفة الحالات الفردية. ومثل ذلك، فإننا في النظرية الحركية للمادة لدينا قوانين إحصائية تحكم المجموعة حصلنا عليهما انطلاقاً من القوانين الإفرادية.

ولكن بالنسبة لفيزياء الكمّ فإن الحالة مختلفة تماماً، إذ أننا نحصل مباشرة هنا على القوانين الإحصائية، وتبقى القوانين الإفرادية مهملة. لقد رأينا أنه في حالة الفوتون أو الإلكترون والثقبين، لا نستطيع وصف الحركة الممكنة للجسيمات الأولية في المكان والزمان كما كنا نفعل في الفيزياء التقليدية. ففيزياء الكمّ تتخلى عن القوانين الإفرادية للجسيمات الأولية وتضع مباشرة القوانين الإحصائية التي تحكم المجموعات. إنه من غير الممكن، استناداً إلى فيزياء الكمّ، القيام بوصف مواقع وسرعات جسيم أولي، أو التنبؤ بمساره المستقبلي، كما هي الحال في الفيزياء التقليدية. ففيزياء الكمّ تتعامل فقط مع المجموعات وقوانينها تتعلق بالمجموع وليس بالأفراد.

إنها الضرورة القاسية، لا الحدس أو الرغبة في التجديد، التي ترغمنا على تغيير التصوّر التقليدي القديم. وقد بيّنا الصعوبات الناجمة عن تطبيق التصوّر القديم في حالة واحدة فقط، ألا وهي ظواهر الحيود. ولكن يمكننا ذكر العديد من الحالات الأخرى المقنعة أيضاً. إن تغيير وجهة نظرنا تُفرض علينا باستمرار كلما حاولنا أن نفهم الواقع. ويبقى دائماً للمستقبل أن يقرر ما إذا كنّا قد قمنا باختيار الطريق الوحيدة الممكنة أم أنه كان بالإمكان إيجاد حل أفضل للصعوبات التي واجهتنا.

لقد اضطررنا إلى إغفال وصف الحالات الإفرادية كأحداثٍ موضوعية في الزمان والمكان وإلى إدخال القوانين الإحصائية، وهذه هي من المزايا الرئيسية لفيزياء الكمّ الحديثة.

عندما أدخلنا في السابق الحقائق الفيزيائية الجديدة مثل الحقل الكهرمغنطيسي وحقل الجاذبية، بذلنا كل جهد لنبيّن بعبارات عامة الصفات المميزة للمعادلات الرياضية التي صيغت بها هذه الأفكار. وسوف نقوم بنفس العمل بالنسبة لفيزياء

الكمّ، ونشير بشكل موجز إلى أعمال بور ودويبرويل وشرودنغر و"هايزنبرغ Heisenberg" و"ديراك Dirac" و"بورن Born".

لندرس حالة إلكترون واحد. قد يكون الإلكترون تحت تأثير حقل كهرمغنطيسي اعتباطي، أو متحرراً من كل تأثير خارجي. وقد يتحرك مثلاً في حقل نواة ذرة أو أن يُحيّد بواسطة بلّورة. وتعلمنا فيزياء الكمّ كيف يمكن صياغة المعادلات الرياضية بالنسبة لأيٍ من هذه المسائل.

لقد أدركنا سابقاً التشابه الموجود بين الوتر المهتز أو غشاء الطبل أو الآلة الهوائية أو أية آلة صوتية من جهة، وبين الذرة المشعة من جهة ثانية. كما يوجد أيضاً بعض التشابه بين المعادلات الرياضية التي تحكم المسألة الصوتية وتلك التي تحكم مسألة فيزياء الكمّ. ولكننا نرى مجدداً أن التفسير الفيزيائي للكميات التي يتم تحديدها في هاتين الحالتين تختلف تماماً. فالكميات الفيزيائية التي تصف الوتر المهتز والذرة المشعة لها معانٍ مختلفة تماماً على الرغم من وجود بعض الشبه الشكلي في المعادلات. في حالة الوتر، نريد أن نعرف ما هو ابتعاد نقطة معينة عن موضعها الطبيعي في لحظة معينة. فإذا عرفنا الشكل الذي يأخذه الوتر المهتز في لحظة ما، يصبح بمقدورنا أن نعرف كل شيء نريده. وهكذا يمكن حساب الابتعاد عن الموضع الطبيعي في أية لحظة بواسطة المعادلات الرياضية العائدة للوتر الهزّاز. يقابل كل نقطةٍ من الوتر ابتعاد محدد عن الوضع الطبيعي، ويعبر عن ذلك بشكل دقيق جداً كما يلي: في أية لحظة، يكون الابتعاد عن القيمة العادلة دالّة function في إحداثيات الوتر. وتشكل جميع نقاط الوتر متصلاً أحادي الأبعاد ويكون الابتعاد دالة تحدّد في هذا المتصل ذي البعد الواحد، ويتم حسابه بمعادلات الوتر المهتز.

وبشكل مماثل نقوم، في حالة الإلكترون، بتحديد دالّة معينة لنقطة ما في الفضاء وفي لحظة معينة، ونسمي هذه الدالّة موجة الاحتمال probability wave. في التشابه الذي نحن بصدده، تقابل موجة الاحتمال الابتعاد عن الموقع العادي في المسألة الصوتية. فموجة الاحتمال، في لحظة ما، هي دالّة في متصل ثلاثي الأبعاد في حين كان الحيود في حالة الوتر في وقت محدد دالة في متصل أحادي البعد. وتشكل موجة

الاحتمال بياناً بمعرفتنا للنظام الكمّي الذي ندرسه وتجعلنا قادرين على الإجابة عن كل الأسئلة الإحصائية المعقولة المتعلقة بهذا النظام. إنها لا تدلنا على موقع وسرعة الإلكترون في لحظة ما لأن ذلك لا معنى له في الفيزياء الكمية، ولكنها تبين الاحتمال بأن نلتقي إلكتروناً في مكان خاص، أو أين توجد أكبر فرصة لمقابلة إلكترون. ولا تشير النتيجة إلى قياس واحد، بل إلى عدد كبير من القياسات المتكررة. وهكذا تحدد معادلات فيزياء الكمّ موجة الاحتمال تماماً كما تحدد معادلات ماكسويل الحقل الكهرمغنطيسي ومعادلات الجاذبية حقل الجاذبية. إن قوانين فيزياء الكمّ هي أيضاً قوانين بنيوية، ولكن معنى المفاهيم الفيزيائية الذي تحدده معادلات فيزياء الكمّ هذه أكثر تجريداً منها في حالة الحقل الكهرمغنطيسي وحقل الجاذبية. وتقدم هذه المعادلات فقط الوسائل الرياضية للإجابة عن أسئلة ذات صفة إحصائية.

لقد درسنا حتى الآن الإلكترون تحت تأثير حقل خارجي. ولو كان لدينا عوضاً عن الإلكترون، الذي هو أصغر شحنة ممكنة، شحنة ضخمة تحتوي على مليارات من الإلكترونات، لكان باستطاعتنا إغفال كل النظرية الكمية ومعالجة المسألة حسب الفيزياء القديمة، أي فيزياء ما قبل الكمّ. وعندما يتعلق الأمر بتيارات تجري في سلك وبنواقل مشحونة وبموجات كهرمغنطيسية، فإننا سنطبق الفيزياء القديمة البسيطة المعبر عنها في معادلات ماكسويل. ولكن لا يمكن القيام بذلك عندما يتعلق الأمر بالكهرضوئية، وبشدة الأشرطة الطيفية، وبالنشاط الإشعاعي، وبحيود الموجات الإلكترونية، وبكثير من الظواهر الأخرى، حيث تتكشف الصفة الكميّة للمادة والطاقة. علينا إذن إذا جاز القول أن نرتقي دوراً إلى أعلى. فبينما كنّا في الفيزياء التقليدية نتحدث عن مواقع وسرعات الجسيم، فإنه يتحتم علينا الآن أن ندرس موجات الاحتمال في متصل ثلاثي الأبعاد يقابل مسألة الجسيم هذه.

إن فيزياء الكمّ تقدم لنا وصفتها الخاصة لمعالجة مسألة معينة، إذا كنّا نعرف كيف يجب معالجة مسألة مماثلة من وجهة نظر الفيزياء التقليدية.

وبالنسبة لجسيم أولي كالإلكترون أو الفوتون، يكون لدينا موجات احتمالية في متصل ثلاثي الأبعاد تميز السلوك الإحصائي للمنظومة إذا تكررت التجارب كثيراً.

ولكن ماذا يحصل عندما لا يتعلق الأمر بجسيم واحد بل بجسيمين يفعل أحدهما على الآخر كإلكترونين مثلاً، أو كإلكترون وفوتون، أو إلكترون ونواة؟ إنه من غير الممكن معالجتهما بشكل منفصل ووصف كل منهما بواسطة موجة احتمال في ثلاثة أبعاد، وذلك بسبب فعلهما المتبادل بالذات. في الواقع، ليس من الصعب كثيراً أن نحزر كيف يجب وصف منظومة مؤلفة من جسيمين متفاعلين في الفيزياء الكميّة. إن موقع نقطتين ماديتين في الفضاء وفي لحظة ما يوصف بستة أعدادٍ، ثلاثة منها لكل نقطة، وجميع المواقع الممكنة للنقطتين الماديتين تشكل متصلاً ذا ستة أبعاد وليس ثلاثة كما هي الحال بالنسبة لنقطة واحدة. وإذا صعدنا الآن مجدداً دوراً إلى أعلى، أي إلى فيزياء الكمّ، يصبح عندنا موجات احتمال في متصل ذي ستة أبعاد وليس في متصل ذي ثلاثة أبعاد كما هو الوضع في حالة الجسيم الواحد. إن المغزى الفيزيائي الوحيد لموجة الاحتمال هي أنها تسمح لنا بالإجابة عن أسئلة إحصائية عاقلة في حال تعدّد الجسيمات كما في حال الجسيم الواحد. فمثلاً بالنسبة لإلكترون واحد يمكننا أن نسأل: ما هو احتمال الالتقاء بإلكترون في مكان معين؟ وفي حالة الجسيمين فإننا نتساءل: ما هو احتمال الالتقاء بالجسيمين في مكانين محددين وفي لحظة معينة؟

إن الخطوة الأولى التي قمنا بها لنحيد عن الفيزياء التقليدية كانت التخلي عن وصف الحالات الفردية كأحداث موضوعية في المكان والزمان. وكنّا مرغمين على استعمال الطريقة الإحصائية التي وفرتها موجات الاحتمال. فباختيارنا هذا الطريق، علينا أن نخطو خطوات أكثر في مجال التجريد. ويجب إدخال موجات الاحتمال المتعددة الأبعاد التي تناسب مسألة تعدّد الجسيمات.

وبهدف الاختصار نريد أن نسمي بالفيزياء التقليدية كل ما هو غير فيزياء الكمّ. فالفيزياء التقليدية وفيزياء الكمّ تختلفان جوهرياً. إن الفيزياء التقليدية تصبو إلى إعطاء وصف للأشياء الموجودة في الفضاء وإلى صياغة قوانين تحكم تفسيرها مع الزمن. ولكن الظواهر التي كشفت لنا الطبيعة الجسيمية والموجبة للمادة والإشعاع، والصفة الإحصائية للأحداث الأولية كالتفكك الإشعاعي، والحيود، وبث الأشرطة الطيفية، وغيرها الكثير من الأحداث، أرغمتنا على التخلي عن هذا التصوّر. لكن فيزياء الكمّ

لا تهدف إلى وصف الأشياء الفردية في الفضاء وتغيّرها مع الزمن. ولا يوجد مجال لعبارات كالجملة التالية: "هذا الشيء هو كذا وكذا، وله هذه الخاصية وتلك". وعوضاً عن ذلك توجد عبارات من نوعٍ آخر مثل: "هناك هذا الاحتمال أو ذاك لأن يكون هذا الشيء الفردي كذا أو كذا، وله هذه الخاصية أو تلك". كما لا يوجد في فيزياء الكمّ قوانين تحكم تغيرات الشيء الفردي مع الزمن، بل يوجد عوضاً عن ذلك قوانين تحكم تبدلات الاحتمال مع الزمن. إن هذا التغيّر الأساسي، الذي أُدخل إلى الفيزياء بواسطة فيزياء الكمّ، هو وحده الذي جعل من الممكن تقديم شرح ملائم للصفة المتقطعة والإحصائية للأحداث في ميدان الظواهر، حيث الكمّات الأولية للمادة والإشعاع تكتشف عن نفسها.

ولكن تظهر مسائل جديدة، صعبة أيضاً، لم يجر إلى الآن توضيحها بشكل نهائي، وسوف نذكر البعض منها فقط. فالعلم ليس ولن يكون أبداً كتاباً مغلقاً. فكل تقدم هام يطرح أسئلة جديدة، وكل تطوّر يكشف على المدى البعيد عن صعوبات جديدة أكبر.

إننا نعرف مسبقاً أنه في الحالة البسيطة التي تتألف من جسيم أو عدة جسيمات نستطيع العبور من الوصف التقليدي إلى الوصف الكمّي، ومن الوصف الموضوعي للأحداث في المكان والزمان إلى موجات الاحتمال. ولكن القارئ يتذكر جيداً الأهمية الفائقة التي أخذها مفهوم الحقل في الفيزياء التقليدية، فكيف يمكننا وصف التفاعل ما بين الكمّات الأولية للمادة والحقل؟ فنحن بحاجة إذن إلى موجة احتمال ذات عددٍ لا متناهٍ من الأبعاد لوصف كمّي للحقل. وإن الانتقال من مفهوم الحقل التقليدي إلى مسألة موجات الاحتمال في فيزياء الكمّ يعتبر خطوة بالغة الصعوبة. فالصعود إلى دور أعلى هنا ليس بالمهمة السهلة، حيث كل المحاولات التي بذلت حتى الآن لحل المسألة يجب اعتبارها غير كافية. وهناك أيضاً مسألة أساسية أخرى. ففي كل حججنا التي تتعلق بالانتقال من الفيزياء التقليدية إلى فيزياء الكم، استعملنا الوصف القديم ما قبل النسبي، حيث كان يجري التعامل مع المكان والزمان بشكل مختلف. ولكن إذا حاولنا أن نبدأ بالوصف التقليدي، كما جاءت به النظرية النسبية، عندها يكون صعودنا نحو

المسألة الكمية معقداً جداً. وهذه هي مسألة أخرى أمسكت بها الفيزياء الحديثة، ولكن حلّها بشكل كامل ووافٍ لا يزال بعيداً. كما توجد أيضاً صعوبة في وضع فيزياء متماسكة عائدة للجسيمات الثقيلة التي تكوّن النواة. فبالرغم من المعطيات التجريبية المتعددة والمحاولات العديدة لإلقاء الضوء على المسألة النووية، فنحن لا نزال في الظلمة فيما يتعلق بالمسائل الأساسية في هذا المجال.

لا ريب في أن فيزياء الكمّ قامت بشرح تنوعٍ غني جداً من الوقائع وانتهت، في معظم الأحيان، إلى توافق ساطع بين النظرية والملاحظة. ففيزياء الكمّ الجديدة تبعدنا أيضاً أكثر عن التصور الميكانيكي القديم، والعودة إلى الموقف السابق يظهر وكأنه مستبعد الحدوث أكثر من أي وقت مضى. ولكن لا مجال للشك في أن فيزياء الكمّ يجب أن ترتكز دائماً على مفهومي المادة والحقل، وهي بهذا المعنى نظرية ثنائية لا تساعد حتى ولو خطوة واحدة في تقدّم مسألتنا القديمة التي تقول بإرجاع كل شيء إلى مفهوم الحقل.

هل سيكون التطوّر اللاحق على طول الخط الذي اختارته فيزياء الكمّ، أم أنه من المحتمل أكثر أن تُدخل أفكار جديدة ثورية على الفيزياء؟ هل سيكون هناك مجدداً انعطاف فجائي في طريق التقدم، كما كانت الحال غالباً في السابق؟

لقد تركزت خلال السنوات الأخيرة كل صعوبات فيزياء الكمّ حول عدد ضئيل من النقاط الأساسية، حيث تنتظر الفيزياء بفارغ الصبر حلّها. ولكن ليس هنالك من وسيلة للتنبؤ متى وأين سوف يتحقق حل هذه الصعوبات.

الفيزياء والواقع:

ما هي الاستنتاجات العامة التي يمكن الحصول عليها من الإطلاع على تطور الفيزياء كما هو معروض هنا في نظرة شاملة تقدم فقط أهم الأفكار الأساسية؟

إن العلم ليس مجموعة من القوانين أو بيان بوقائع غير مرتبطة ببعضها البعض. إنه إبداع العقل الإنساني بأفكاره ومفاهيمه المبتكرة بحرّية. فالنظريات الفيزيائية تحاول أن تكوّن صورة عن الواقع وتحاول ربطها بالعالم الواسع من انطباعات الحواس.

وهكذا فإن التبرير الوحيد لبنياتنا العقلي يرتكز على ما إذا كانت نظرياتنا تشكل هذه الرابطة وكيف تشكلها.

لقد رأينا حقائق جديدة جرى اكتشافها عن طريق تقدم الفيزياء. ولكن يمكننا الرجوع بهذه السلسلة من النشاطات الخلاّقة إلى ما قبل نقطة انطلاق الفيزياء. فأحد المفاهيم الأكثر بدائية هو مفهوم الشيء (الجسم). ومفاهيم الشجرة والحصان أو أي جسم مادي هي مبتكرات تستند إلى التجربة بالرغم من أن الانطباعات التي ورائها بدائية بالمقارنة مع عالم الظواهر الفيزيائية. إن القط الذي يضايق الفأرة يبتدع هو أيضاً بواسطة الفكر حقيقة أولية. وبما أن القط يستجيب دائماً بنفس الطريقة تجاه أية فأرة يصادفها، فذلك يدل على أنّه يكوّن مفاهيم ونظريات توجهه في خضم عالمه الخاص من انطباعات الحواس.

إن "الثلاث أشجار" هي شيء مختلف عن "الشجرتين". وكذلك فإن "الشجرتين" هما شيء مختلف عن "الحجرين". وما مفاهيم الأعداد الصافية 2 و3 و4... المحررة من الأشياء التي ولّدتها إلا صنيعة العقل المفكر الذي يصف حقيقة عالمنا.

إن الشعور النفسي الذاتي بالوقت يسمح لنا بأن نرتّب انطباعاتنا وبأن نجعل حدثاً يتقدم على آخر، ولكن ربط كل لحظة من الوقت بعدد عن طريق استعمال الساعة واعتبار الوقت متصلاً ذا بعد واحد، أمر يعتبر اكتشافاً. وينطبق الشيء ذاته على مفاهيم الهندسة الإقليدية وغير الإقليدية وعلى فضائنا المعتبر كمتصل ذي أبعاد ثلاثة.

لقد بدأت الفيزياء فعلاً مع ابتكار الكتلة والقوة ونظام العطالة. فكل هذه المفاهيم كانت اكتشافات حرة، وأدّت إلى صياغة وجهة النظر الميكانيكية. لقد كانت حقيقة عالمنا الخارجي، بالنسبة للفيزيائي الذي عاش في بداية القرن التاسع عشر، مؤلفة من جسيمات وقوى بسيطة تتفاعل فيما بينها وتتوقف فقط على المسافة. وقد بذل هذا الفيزيائي جهده للاحتفاظ، أطول مدة ممكنة، باعتقاده بأنه سينجح في تفسير كل أحداث الطبيعة بواسطة هذه المفاهيم الأساسية. لكن الصعوبات العائدة إلى انحراف الإبرة المغنطيسية وتلك التي تعود إلى بنية الأثير دفعتنا إلى ابتكار واقع أكثر

دقة. فظهر اختراع الحقل الكهرمغنطيسي. ولقد كان يلزمنا خيال علمي جريء لكي ندرك تماماً أن ليس سلوك الأجسام ذاتها بل سلوك شيء ما موجود بينها، أي الحقل، هو الذي سيكون مهماً لترتيب الأحداث وفهمها.

لقد هدمت التطورات اللاحقة المفاهيم القديمة وخلقت مفاهيم جديدة، وجعلتنا النظرية النسبية نتخلى عن الوقت المطلق وعن نظام الإحداثيات العطالي. ولم يعد الوقت ذو البعد الواحد والفضاء الثلاثي الأبعاد هما اللذان يشكلان خلفية كل الأحداث، بل متصل الزمان – المكان (الزمكان) الرباعي الأبعاد، الذي يعتبر اختراعاً حراً جديداً مع خصائص جديدة للتحويل. ولم يعد نظام الإحداثيات العطالي ضرورياً، وأصبح بالإمكان استخدام أي نظام إحداثي لوصف الأحداث في الطبيعة.

وخلقت نظرية الكمّات بدورها ميزات جديدة وهامة لواقعنا. فالانقطاع حلّ محل الاستمرارية. وعوضاً عن وجود قوانين تحكم الأفراد ظهرت قوانين الاحتمال.

إن الواقع الذي خلقته الفيزياء الحديثة بعيد جداً عن الواقع الذي كان موجوداً عند إنطلاقة العلم، ولكن هدف كل نظرية فيزيائية يبقى دائماً هو ذاته.

إننا نحاول بمساعدة النظريات الفيزيائية إيجاد طريقتنا في متاهة الوقائع التي نلاحظها، كما نحاول ترتيب عالم انطباعاتنا الحسية وفهمه. ونرغب بأن تنسجم بشكل منطقي الوقائع الملاحظة مع مفهومنا للواقع. وبدون الإيمان بإمكانية إدراك الحقيقة عن طريق بنياننا النظري، وبدون الاعتقاد بالانسجام الداخلي لعالمنا لا يمكن أن يكون هنالك علم. إن هذا الاعتقاد كان وسيبقى دوماً الدافع الأساسي وراء كل ابتكار علمي. ومن خلال كل الجهود التي نبذلها في كل صراع مأساوي بين النظرية القديمة والنظرة الجديدة نتحسّس التوق الأزلي إلى الفهم، ونتعرف على الاعتقاد الثابت دوماً بأن عالمنا هو في غاية الانسجام، ويتعزز ذلك باستمرار من خلال العوائق التي تقف في طريق فهمنا للأمور.

باختصار:

من جديد نرى أن تنوّع الوقائع الغني في ميدان الذرّة يُرغمنا على ابتكار مفاهيم فيزيائية جديدة. فالمادة لها بنية حبيبية، وهي مركبة من جسيمات أولية تشكل الكمّات الأولية للمادة. والشحنة الكهربائية لها أيضاً بنية حُبيبية وكذلك الطاقة، حيث يعتبر كل ذلك في غاية الأهمية من وجهة نظر نظرية الكمّ. أما الفوتونات فهي كمّات الطاقة التي يتألف منها الضوء.

هل الضوء موجة أم وابل من الفوتونات؟ وهل شعاع الإلكترونات وابل من الجسيمات الأولية أم موجة؟ إن هذه الأسئلة الأساسية تفرضها التجربة على الفيزياء. وفي بحثنا للإجابة عنها علينا أن نتخلّى عن وصف الأحداث الذرية وكأنها تحدث في المكان والزمان. كما يجب أن نبتعد أيضاً أكثر عن التصوّر الميكانيكي القديم. ففيزياء الكم تصوغ قوانين تحكم جموعاً وليس أفراداً. ولا يتم فيها وصف الخصائص وإنما الاحتمالات، ولا تصاغ القوانين التي تكشف عن مستقبل المنظومات، بل القوانين التي تحكم تغيّر الاحتمالات مع الوقت، وتتعلق بمجموعات كبيرة من الأفراد.

الفصل الثاني

الحوادث المغناطيسية

الفصل الثاني

الحوادث المغناطيسية

تمهيد:

لوحظت ظواهر التمغنط لبعض المواد في الطبيعة منذ القدم، ولم تدرس هذه الظواهر دراسة دقيقة إلا بعد أن تمكن العلماء من الحصول على المغانط بطريقة صنعية.

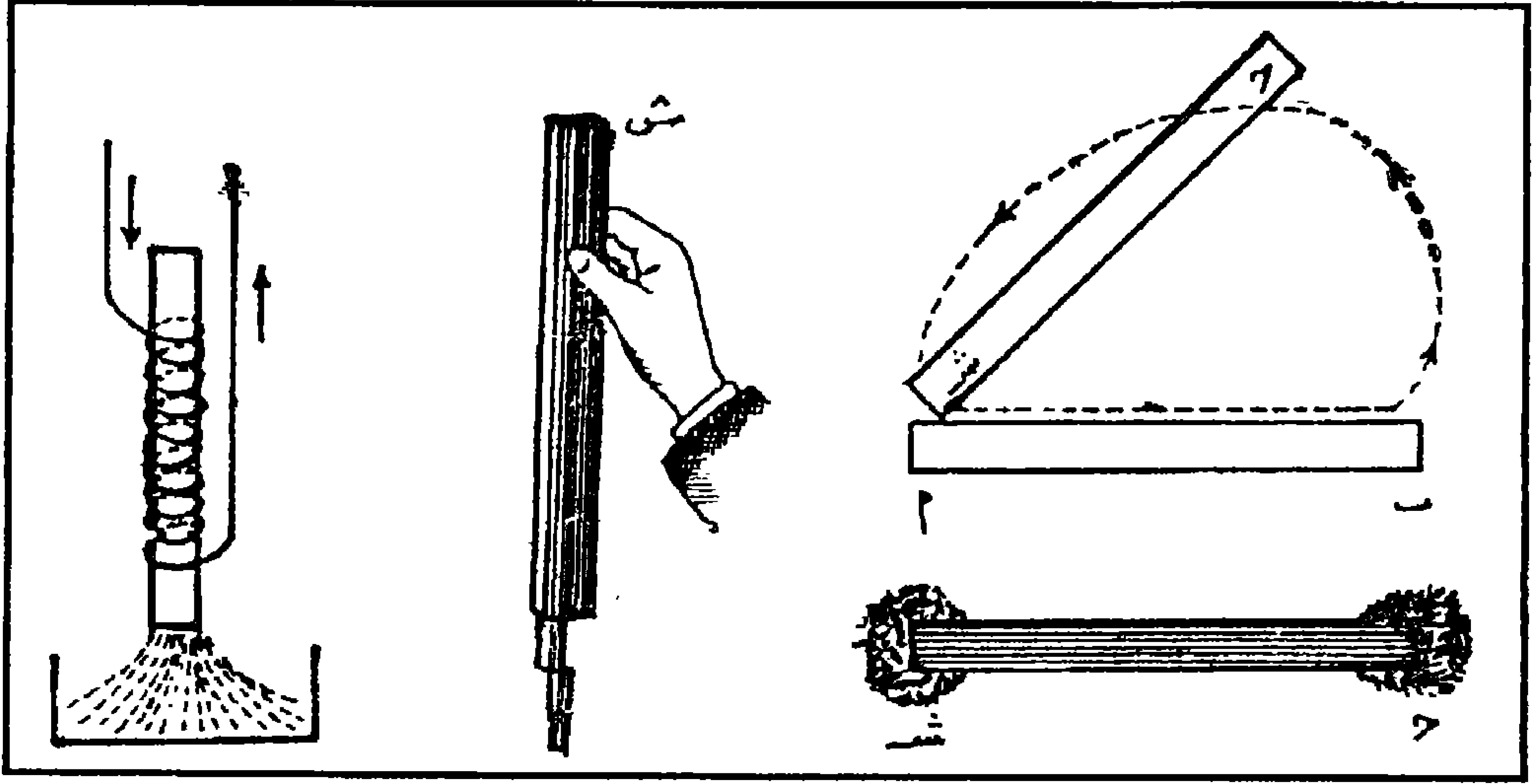
تتصف بعض النماذج الطبيعية من فلز أكسيد الحديد المغناطيسي Fe3O4 بخاصة جذب برادة الحديد، وتدعى هذه النماذج بالمغانط الطبيعية، ويكثر انتشار هذا الفلز في مدينتين، تدعى كل منهما مغنيسياً، تقع المدينة الأولى في اليونان، والثانية في تركيا. ومن هنا نشأ اسم المغناطيس ولهذا السبب سمي الأكسيد Fe3O4 بأكسيد الحديد المغناطيسي إذا ألقينا حجراً من هذه الفلزات في برادة الحديد تجمعت وعليه البرادة في مواضع مختلفة من سطحه بشكل ذؤابات.

المغنطة:

يقصد بالمغنطة عملية صنع المغانط، وتتم هذه العملية بثلاثة طرق:

أ. **المغنطة بالدلك:** إذ دلكنا قضيباً فولاذياً مثل أ ب بقطب مغناطيسي ما عدة مرات وباتجاه واحد وجدنا أنه قد تمغنط، وأصبح بإمكانه جذب برادة الحديد من طرفيه كما في (الشكل 1) ويصبح الطرف الذي ينتهي فيه الدلك عكس القطب الدالك.

ب. **المغنطة بالتأثير:** إذا قربنا مغناطيسياً من مسمار حديدي، وجدنا المسمار ينجذب إلى المغناطيس لأنه أصبح مغناطيساً بالتأثير ويستطيع جذب مسمار آخر وهكذا دواليك... (الشكل 2).



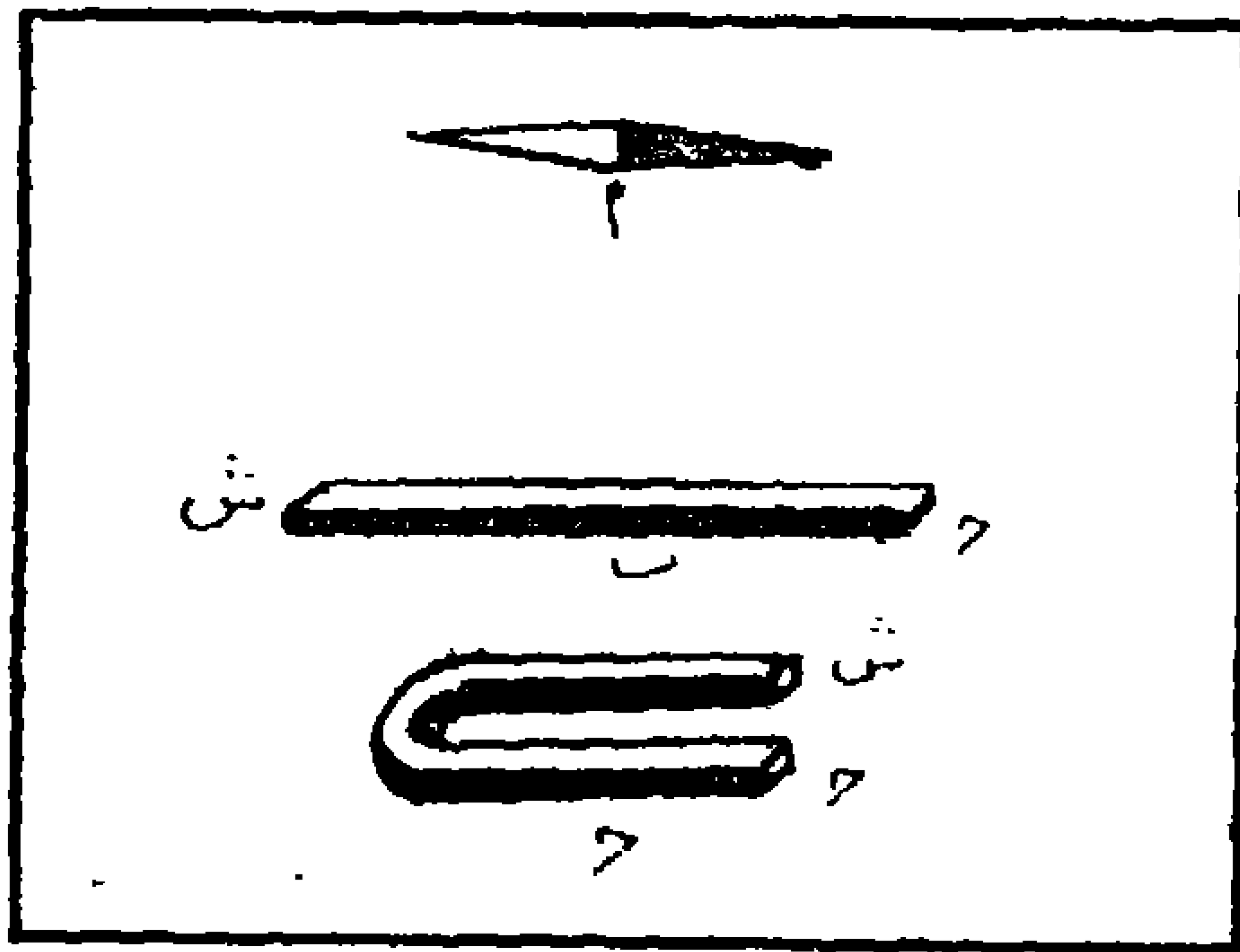
الشكل (1)　　　الشكل (2)　　　الشكل (3)

فالمغناطيس يؤثر في المسمار الحديدي القريب منه حتى ولو لم يلامسه، جاعلاً منه مغناطيسياً جديداً. فالمغنطة بالتأثير تتم بجعل الجسم المراد مغنطته قريباً من قطب مغناطيس أو ملامساً له.

ج. **المغنطة بالتيار الكهربائي:** نضع قضيباً من الفولاذ داخل وشيعة، ونقرب من طرفيه كمية من برادة الحديد فنجدها لا تنجذب نحوه. نمر تياراً كهربائياً في سلك الوشيعة فنجد أن البرادة قد انجذبت (الشكل 3) وإذا قطعنا التيار الكهربائي بقيت كمية من البرادة عالقة بطرف القضيب؛ مما يدلنا على أن القضيب الفولاذي أصبح مغناطيساً.

المغناطيسي الدائم والمغناطيس المؤقت:

إذا استبدلنا في التجربة السابقة (الشكل 3) بالنواة الفولاذية قضيباً من الحديد المطاوع، لاحظنا انجذاب البرادة إلى طرف القضيب عند مرور التيار الكهربائي إلا أنه لدى قطع التيار لا تعود للنواة الحديدية أية قدرة على جذب برادة الحديد وعلى هذا فالحديد والفولاذ يتمغنطان. إنما مغنطة الفولاذ دائمة بينما مغنطة الحديد مؤقت. وتكون المغانط الصنعية الدائمة على أشكال مختلفة، منها الإبراة المغناطيسية وهي بشكل معين، والقضبان المغناطيسية وتكون بشكل موشوري، أو بشكل متوازي المستطيلات أو بشكل أسطواني، كما تصنع على شكل نعل الفرس وتدعى بالمغناطيس النضوي (الشكل 4) (أ، ب، جـ).



الشكل (4)

الأجسام القابلة للتمغنط والأجسام غير القابلة له:

إذ استبدلنا في تجارب البنود السابقة بقطع الحديد والفولاذ قطعاً من النحاس، وجدنا أن هذه الأخيرة لا تتمغنط وبالتالي لا تجذب إليها برادة الحديد، مما يجعلنا نميز بين نوعين من الأجسام: 1) الأجسام القابلة للتمغنط كالحديد والنيكل والكوبالت وبعض الخلائط. 2) والأجسام غير القابلة للتمغنط كالنحاس والتوتياء والزجاج والورق.

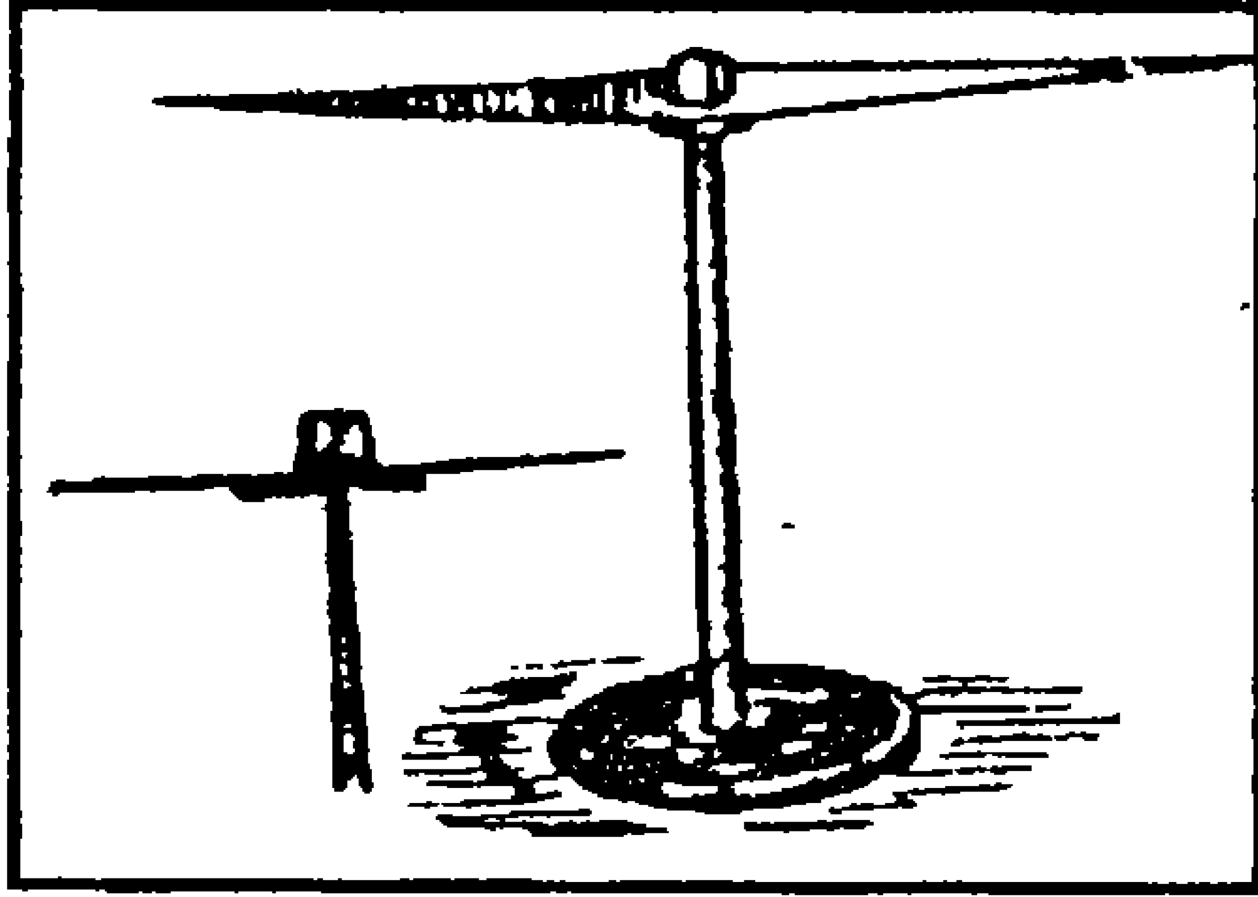
قطبا المغناطيسي:

لكل من المغانط الصنيعة طرفان تتجمع عليهما برادة الحديد على شكل ذؤابتين، يدعى هذان الطرفان بقطبي المغناطيس، أما المنطقة الوسطى بين القطبين فلا تجذب

برادة الحديد لذا تدعى بالمنطقة المعتدلة. ويمكن اعتبار كل من القطبين كنقطة تتجمع فيهما المغناطيسية:

وتدل التجربة أنه كلما كان المغناطيس طويلاً ورفيعاً قربت نقطتا قطبيه من طرفيه، وكلما كان غليظاً وقصيراً ابتعدت النقطتان عن طرفيه نحو وسطه.

وإذا ركزت إبرة مغناطيسية على حامل شاقولي بحيث تكون حرة الدوران في مستوى أفقي (الشكل 5) فإنها تتزن في اتجاه معين هو تقريباً الشمال الجنوب الجغرافي، وإذا أزيحت عن وضعها السابق وتركت وشأنها عادت إليه بعد ذبذبات قليلة.

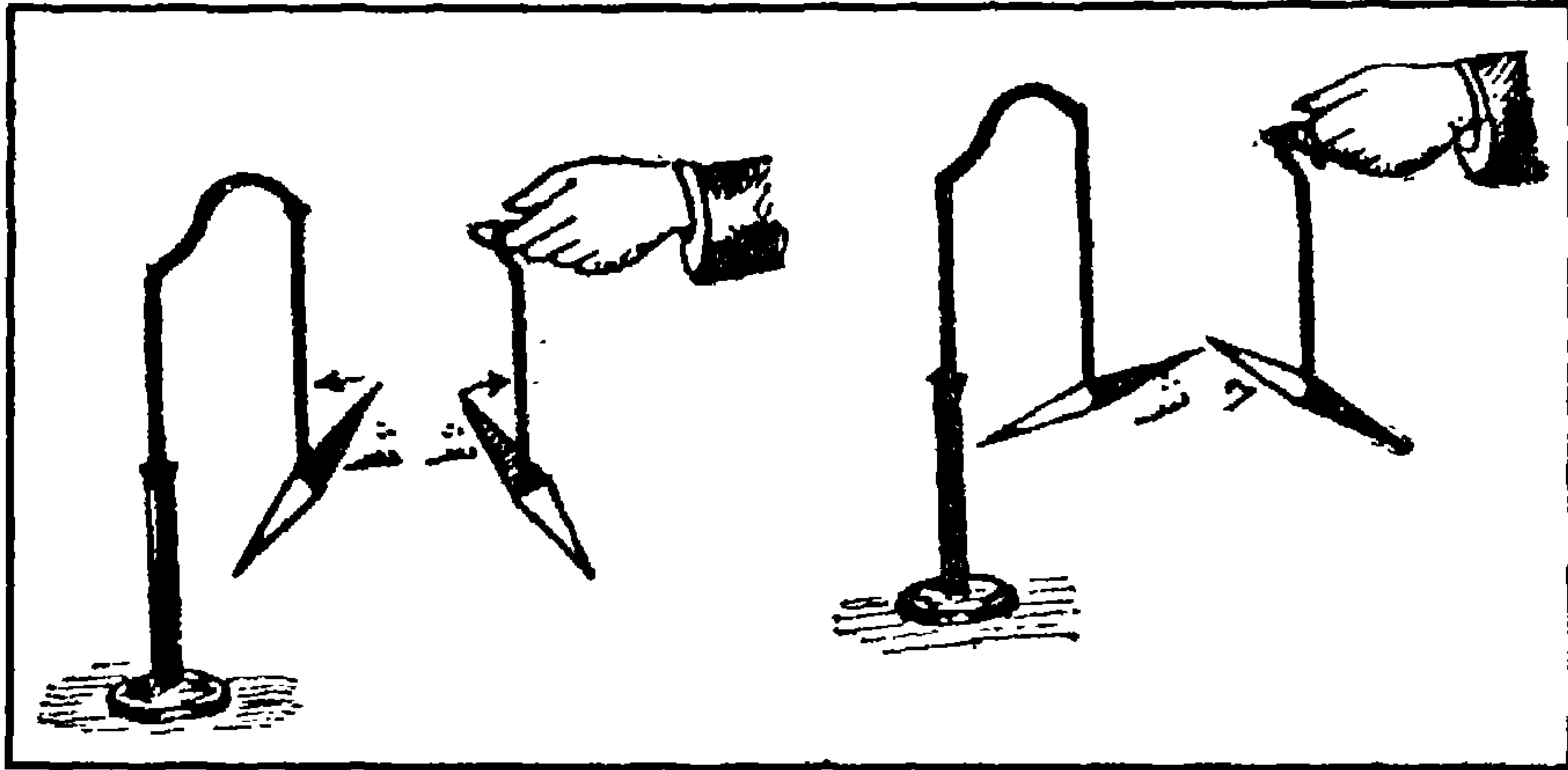


الشكل 5

نستدل من ذلك أن أحد القطبين يتجه دائماً نحو الشمال والآخر دائماً نحو الجنوب. أي أن القطبين مختلفان، يسمى الأول بالقطب الشمالي ويرمز له بالحرف شـ والثاني بالقطب الجنوبي ويرمز له بالحرف جـ.

الأفعال المتبادلة بين الأقطاب المغناطيسية – التجاذب والتدافع:

إذا قربنا القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية من القطب الجنوبي لإبرة مغناطيسية ثانية، نجد أن القطبين يتجاذبان وبالتالي الإبرتين الحرتي الحركة تتجاذبان، كما في (الشكل 6)، على حين إذا قربنا قطبين متماثلين أحدهما من الآخر، كقطب شمالي من آخر شمالي أو قطب جنوبي من آخر جنوبي، نجد أن القطبين يتدافعان وبالتالي نجد أن الإبرتين تتدافعان ومنه نستنتج: القطبان المغناطيسيان المتماثلان يتدافعان والمختلفان يتجاذبان. وتفيدنا خاصة التجاذب والتدافع هذه في تعيين نوع القطب المغنطيسي.

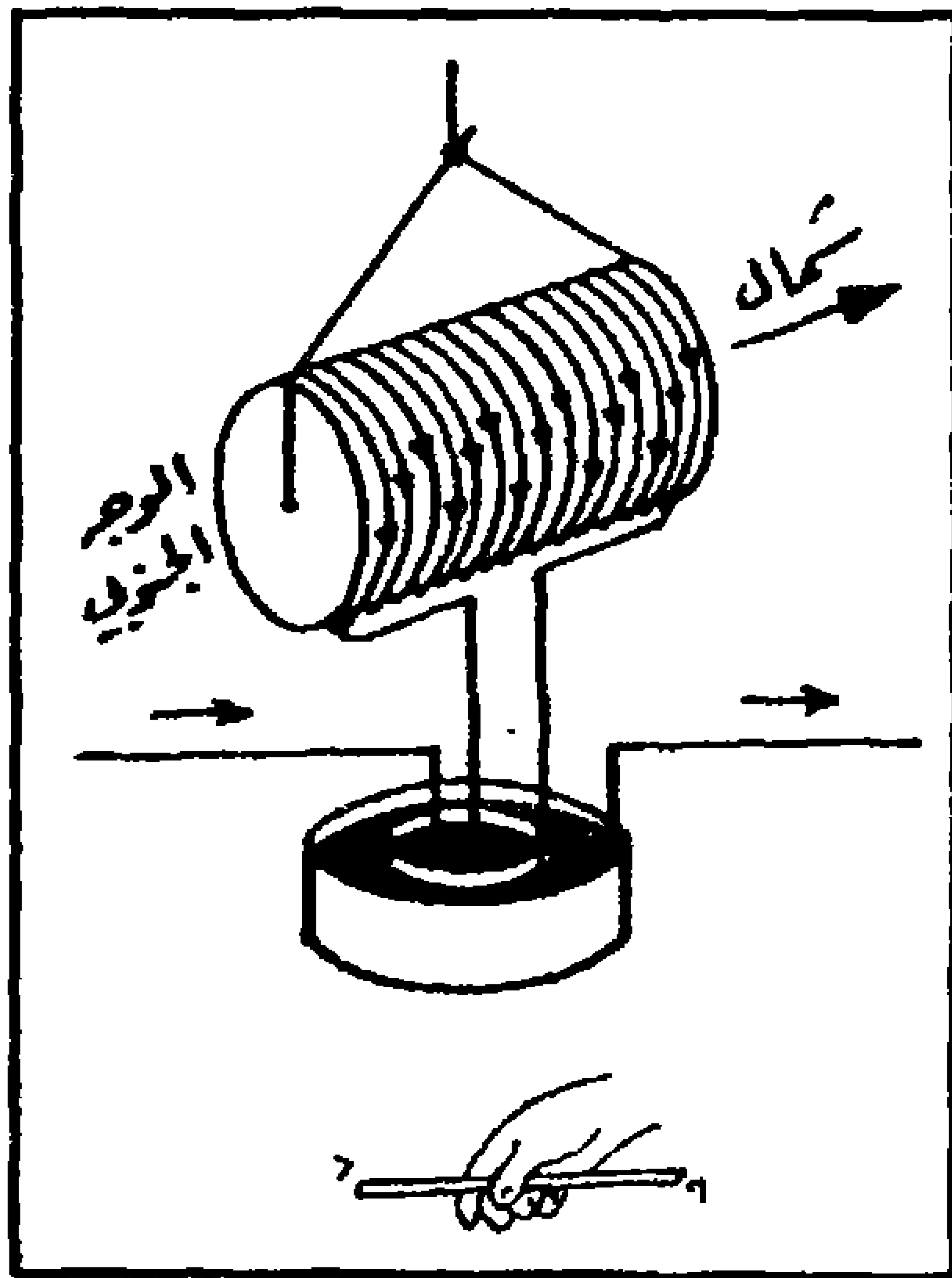


الشكل (6)

التيارات:

توجه دارة يجتازها تيار:

نلف سلكاً نحاسياً معزولاً حول أسطوانة دائرية من الورق المقوى، فنحصل على مجموعة من الحلقات (يسمى مجموعها وشيعة) نعلق هذه الوشيعة بخيط غير مفتول وباستعمال وعائي زئبق متمركزين كما في الشكل (7) نمرّ تياراً كهربائياً في الوشيعة الآنفة الذكر فنلاحظ بعد برهة من الزمن أنها تتوجه وتأخذ وضعاً معيناً وتستقر في هدوء، ونلاحظ أيضاً أن أحد طرفي الوشيعة يتجه نحو الشمال الجغرافي والآخر نحو الجنوب الجغرافي، إذاً تتشابه الوشيعة مع المغناطيس في توجهها.



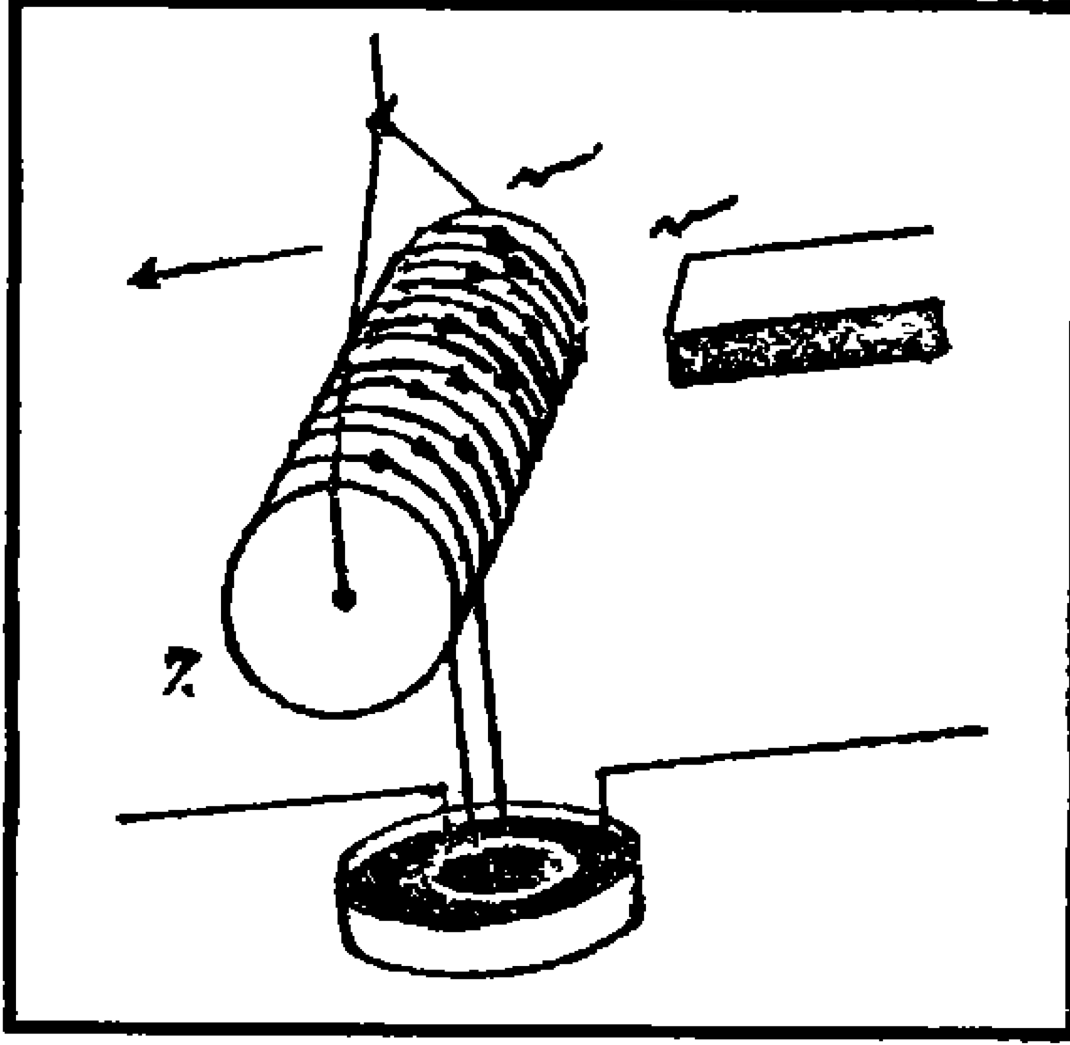
(الشكل 7)

لنعكس جهة التيار في الدارة فنلاحظ أنها تدور بمقدار 180 درجة. ويصبح الوجه المتجه سابقاً نحو الشمال متجهاً نحو الجنوب والآخر يتجه نحو الشمال، إذاً يتعلق هذا التوجه أيضاً بجهة التيار ونلخص ذلك بقولنا:

لكل وشيعة يجتازها تيار وجهان شمالي وجنوبي، ويتعلق وضع هذين الوجهين بجهة التيار. وبصورة عامة يكون الوجه الشمالي إلى يسار ملاحظ مضطجع على سلك الوشيعة يجتازه التيار من قدميه إلى رأسه وناظر إلى محورها.

تأثير مغناطيس في وشيعة:

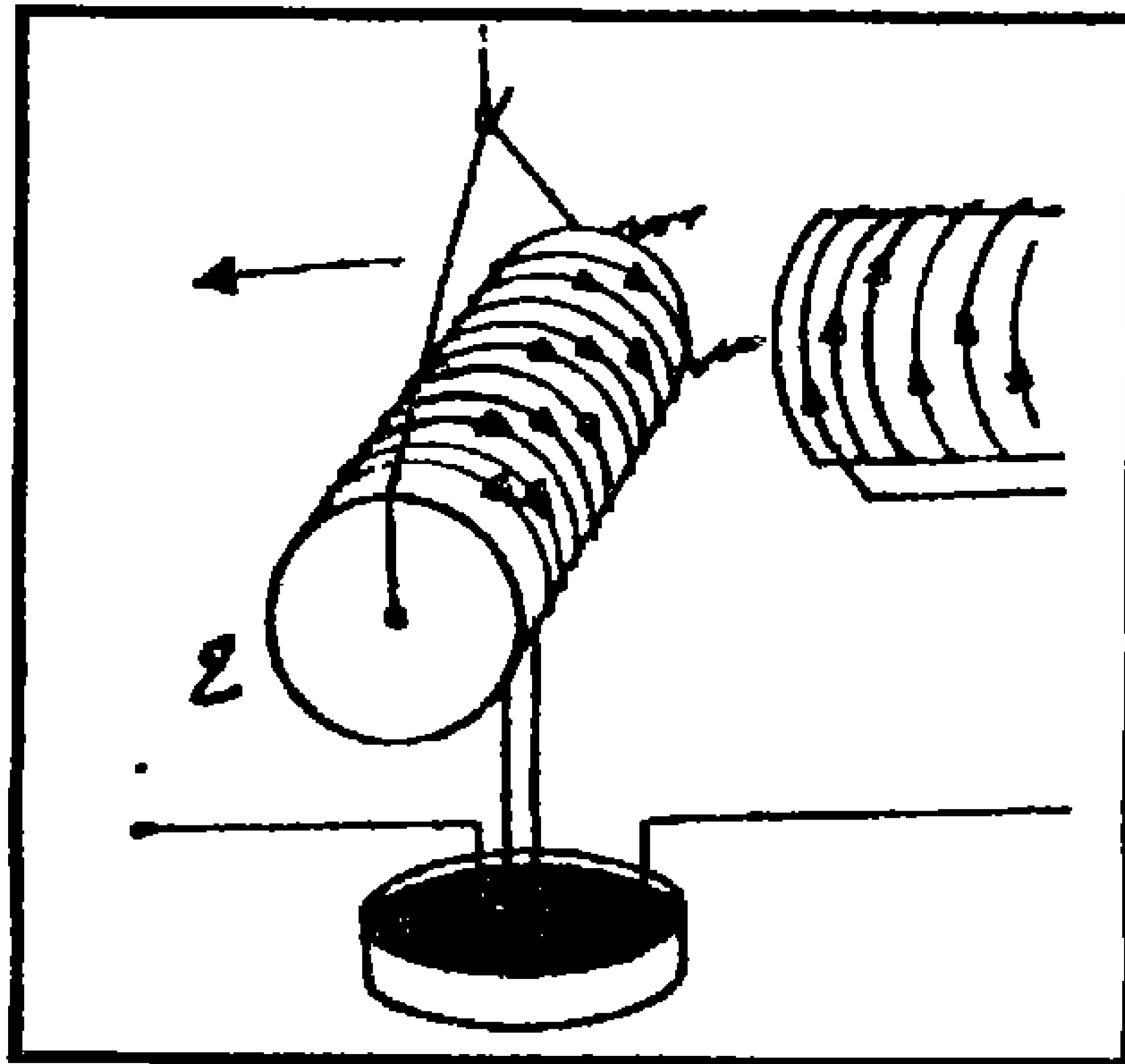
نقرب من الوجه الشمالي للوشيعة السابقة القطب الشمالي لمغناطيس فنلاحظ أنه يدفع الوجه الشمالي للوشيعة. ولو قربنا القطب الجنوبي للمغناطيس من الوجه الشمالي للوشيعة نرى أنهما يتجاذبان (الشكل 9).



الشكل (9)

إذاً يمكن أن نطبق هنا قانون التجاذب والتدافع المغناطيسي الآنف الذكر.

كذلك لو استبدلنا المغناطيس بوشيعة أخرى يجتازها التيار ووضعنا وجهها الشمالي أمام الوجه الشمالي للوشيعة السابقة فإنهما يتدافعان (الشكل 10).



الشكل (10)

إذاً هناك تشابه تام بين المغانط والوشائع. وبصورة عامة يوجد تشابه بين المغانط والتيارات: لهذا نلاحظ أن هناك تأثيراً متبادلاً لكل منهما على الآخر لذا يمكن إجمال الحوادث المشابهة للحوادث السابقة في قسم عام من الفيزياء يطلق عليه اسم الكهربائية المغناطيسية أو اختصاراً الكهرطيسية.

المجال المغناطيسي:

وجود المجال المغناطيسي:

إن كل الآثار الكهرطيسية التي ذكرناها سابقاً حوادث يتم فيها التأثير عن بعد كما هو الحال في (الكهرباء الساكنة) لذلك نقبل بوجود مجال خاص نسميه المجال المغناطيسي.

ونعرفه كما يلي:

المجال المغناطيسي هو منطقة من الفضاء تخضع أية إبرة مغناطيسية موضوعة في نقطة منها لأفعال كهرطيسية توجهها باتجاه معين.

ولما كانت الإبر المغناطيسية المعلقة في الفضاء بعيداً عن أي مغناطيس أو تيار، تتوجه باتجاه الشمال الجنوب المغناطيسي، لذلك يقال إنها تخضع لفعل المجال المغناطيسي الأرضي.

كذلك يولد كل مغناطيس وكل تيار في المنطقة المجاورة لهما مجالاً مغناطيسياً.

جهة وشدة المجال المغناطيسي (شعاع التحريض):

إن جهة المجال المغناطيسي في نقطة هي جهة الخط الواصل بين القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية صغيرة معلقة في هذه النقطة.

أما شدة المجال المغناطيسي فتقاس بوحدة اسمها تسلا، ويمثل المجال المغناطيسي في نقطة منه بشعاع يتناسب مع شدته يسمى شعاع التحريض المغناطيسي.

المجال المغناطيسي المنظم:

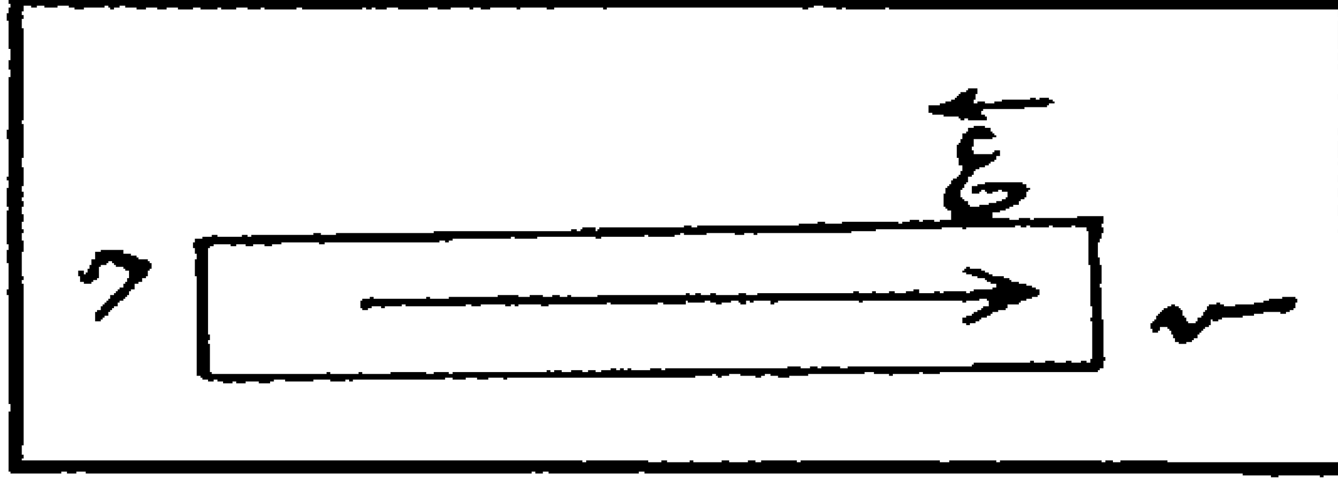
لنأخذ عدداً من الإبر المغناطيسية الصغيرة ونضع بعضها بعيداً عن بعض بعداً مناسباً ولتكن بعيدة عن أي مغناطيس آخر، ويمكن التحقق من أن الإبر تتوجه موازية بعضها لبعض، فنقول إنه في منطقة محددة من الفضاء المحيط بالأرض يكون المجال المغناطيس الأرضي منتظماً.

وبصورة عامة: يكون مجال مغناطيسي ما منتظماً إذا كان اتجاهه واحداً في مختلفة نقاطه. مثلاً يكون المجال المغناطيسي بين فرعي مغناطيس نضوي مجالاً منتظماً، كذلك

فإن المجال المغناطيسي في جوف وشيعة يجتازها تيار كهربائي، يعدّ مجالاً منتظماً بالقرب من مركزها. وتكون أشعة التحريض متوازية في مختلفة نقاط المجال المغناطيسي.

تأثير المجال المغناطيسي على مغناطيس موضوع فيه:

لو علقنا إبرة مغناطيسية في مكان ما بعيدة عن تأثير أي مغناطيس فإنها تدور وتتوجه باتجاه الشمال المغناطيسي الأرضي. ولو وضعنا مغناطيساً حرّ الحركة في مجال مغناطيسي منتظم نرى أنه يدور حول محور تعليقه متوجهاً باتجاه الشمال المغناطيسي للمجال المغناطيسي المؤثر، ونحن نعلم أن أي جسم يدور حول محور يخضع لفعل مزدوجة. لذلك نقول إن قضيباً مغناطيسياً موضوعاً في مجال مغناطيسي منتظم يخضع لفعل مزدوجة مغناطيسية.



الشكل 11

المزدوجة المغناطيسية:

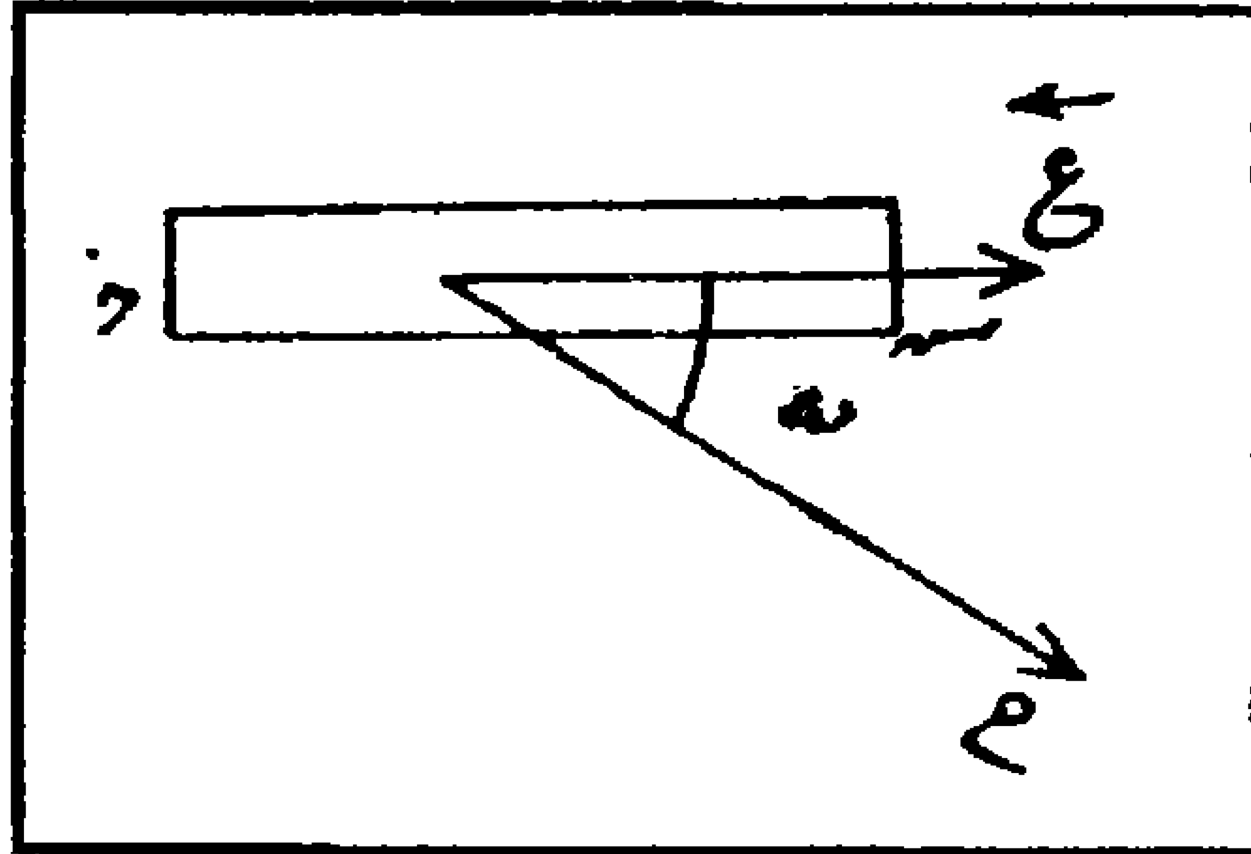
تدل التجربة على أن عزم المزدوجة المغناطيسية التي يخضع لتأثيرها مغناطيس موضوع في مجال تحريض مغناطيسي شدته ح⃖ تتعلق بالعوامل الآتية:

أ. المغناطيس نفسه.

ب. المجال المغناطيسي المؤثر.

جـ. الزاوية به التي يصنعها اتجاه شعاع التحريض مع خط قطبي المغناطيس.

وبالتجربة الدقيقة يتبين أن عزم المزدوجة عز يتناسب طرداً مع ح⃖ شدة شعاع التحريض، ويتناسب طرداً مع جيب الزاوية به الكائنة بين ح⃖ وخط قطبي المغناطيس.



شكل 12

ونكتب عز = ثا × ح × حب به.

دار جرير للنشر والتوزيع

وهذا الثابت مقدار لا علاقة له بالمجال الذي يوضع فيه المغناطيس بل يختلف من مغناطيس لآخر وقيمته العددية تساوي عز المزدوجة إذا كانت شدة شعاع التحريض تسلا واحدة وإذا كان جيب الزاوية به يساوي الواحدة، أي إذا تعامد المغناطيس مع شعاع التحريض. لذا يطلق على هذا الثابت اسم العزم المغناطيسي للمغناطيس ويرمز له بالرمز ع. وهو مقدار يميز المغناطيس عن مغناطيس آخر.

وتصبح العلاقة التي تعطي قيمة عزم المزدوجة المغناطيسية بالشكل:

عز = ع × ح × حب به

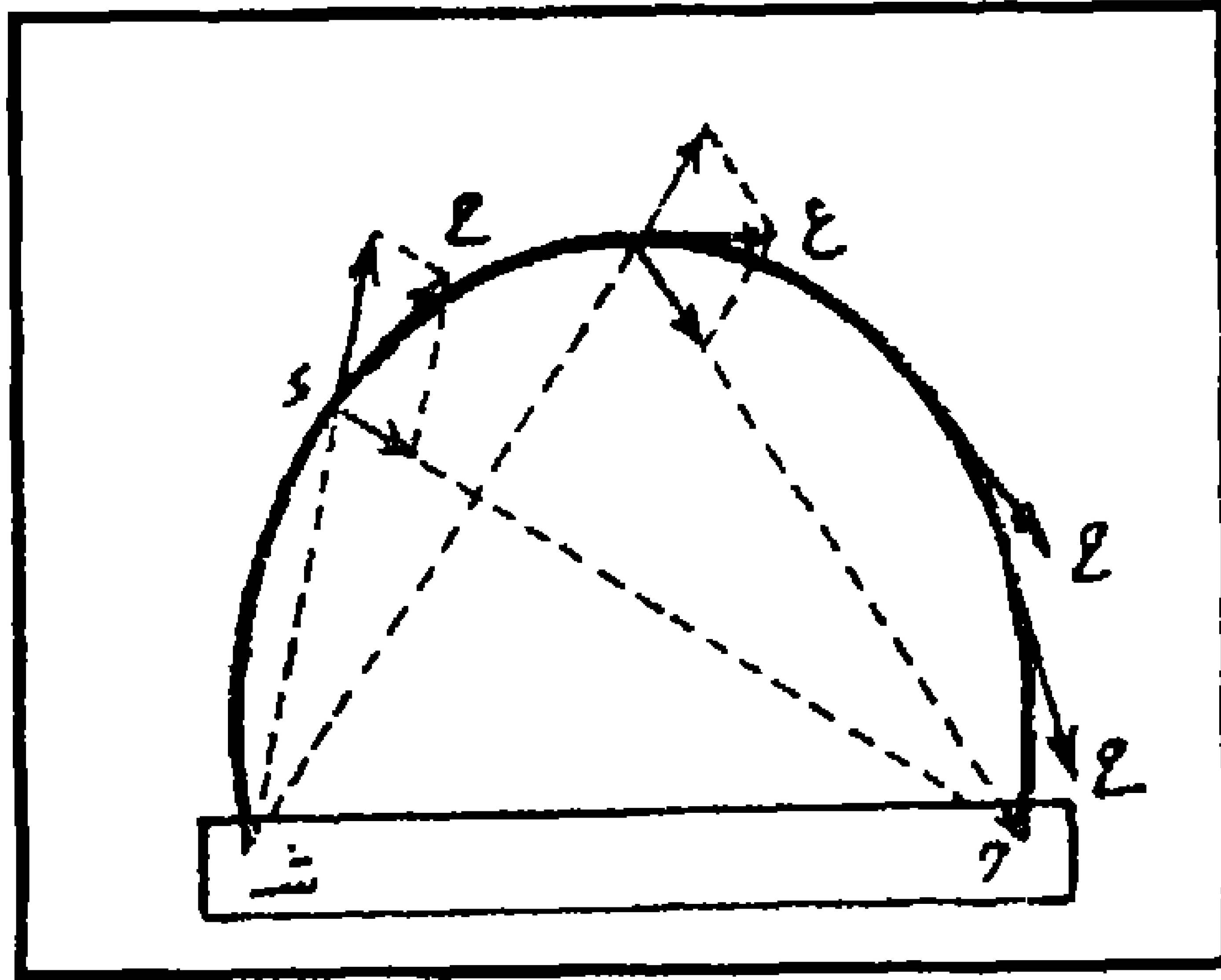
وواضح أن هذا العزم ينعدم إذا توازى المغناطيس مع شعاع التحريض ويصبح أعظم ما يمكن عندما يتعامد شعاع التحريض مع المغناطيس حيث يساوي عزم المزدوجة، في هذه الحالة: (عز = ع × ح).

أما إذا كانت بين المغناطيس وشعاع التحريض في مجال منتظم زاوية به فإن المزدوجة المغناطيسية (عز = ع × ح × حب به) تدير المغناطيس بحيث ينطبق محوره على شعاع التحريض المغناطيسي. ويجتازه شعاع التحريض من قطبه الجنوبي إلى قطبه الشمالي.

ملاحظة: يقاس عزم المزدوجة بالمتر × نيوتن. ويقدر العزم المغناطيسي لمغناطيس بوحدة اسمها وحدة العزم المغناطيسي في الجملة الكهربائية العملية.

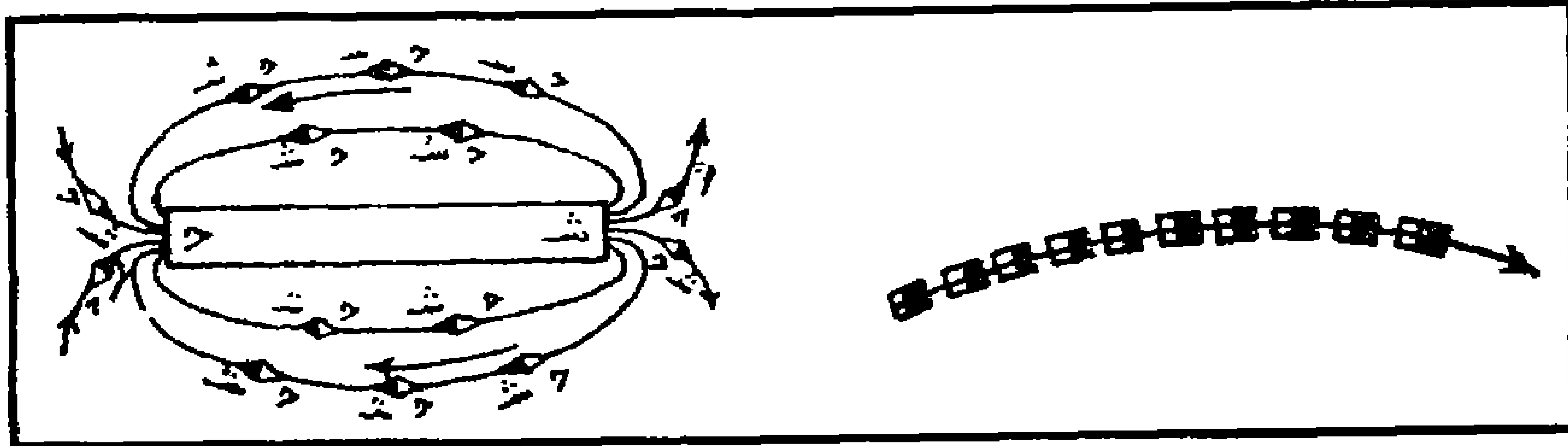
خطوط القوى المغناطيسية:

خطوط القوى المغناطيسية هي المنحنيات المماسة في كل نقطة من نقاطها لشعاع التحريض المغناطيسي ح في تلك النقطة. وجهة هذه الخطوط هي جهة شعاع التحريض.



الشكل (13)

فالقطب المغناطيسي الشمالي الموضوع في نقطة د من المجال ينتقل بتأثير قوى المجال في اتجاه خطوط القوة، ومسار هذا القطب إنما هو خط القوة (الشكل 13). وتخرج خطوط القوة من القطب الشمالي للمغناطيس، ثم تنحني عائدة إلى القطب الجنوبي، وتدخل منه حيث تجتاز المغناطيس من قطبه الجنوبي إلى قطبه الشمالي (الشكل 14) ونحصل عملياً على خطوط القوة بأن نضع مغناطيساً ش ـ حـ فوق ورقة على منضدة (الشكل 15) ونقرب من قطبه الشمالي إبرة ممغنطة قصيرة جداً؛ معلقة بخيط عديم الفتل وندنيها من نقطة بالقرب من القطب الشمالي للمغناطيس.



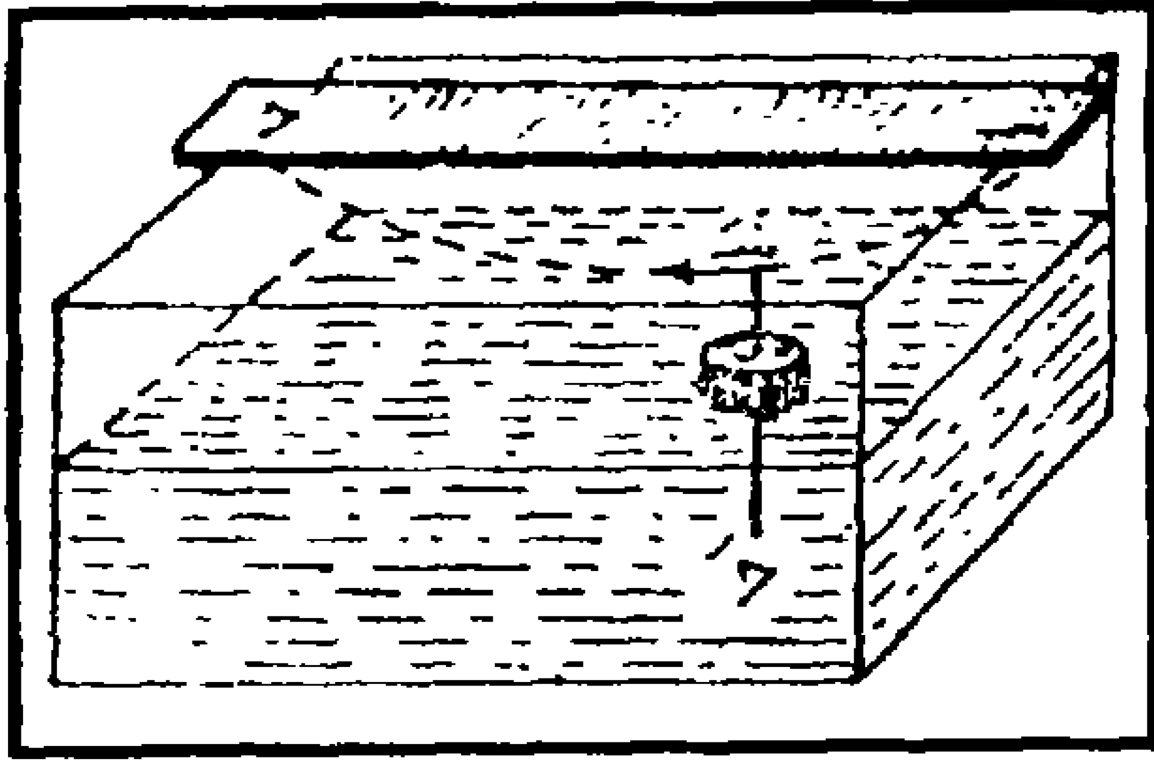
الشكل (15) الشكل (14)

وعندما تسكن الإبرة تماماً نرسم على الورقة نقطتين تجاه قطبيها، فالخط الواصل بين النقطتين يعين منحى التحريض المغناطيسي في النقطة التي تكون فيها الإبرة، ثم ننقل الإبرة إلى نقطة تجاور النقطة السابقة بحيث يقع قطبها الجنوبي مكان قطبها الشمالي، ونشير بنقطة أمام قطبها الشمالي، وننقل الإبرة إلى نقطة ثالثة مجاورة وهكذا حتى نصل إلى القطب الجنوبي للقضيب المغناطيسي.

فإذا وصلنا هذه النقاط المتقاربة بعضها ببعضها الآخر حصلنا على خط

منحن، يمس في كل نقطة من نقاطه شعاع التحريض المغناطيسي في هذه النقطة ويسمى خط القوة.

ويمكن بيان شكل وجهة خطوط القوة لمغناطيس بالتجربة التالية: (الشكل 16) نضع مغناطيساً طويلاً على حافة حوض ملء قسم منه بالماء ويطفو على سطحه قرص من الفلين



الشكل (16)

تنفذ منه إبرة فولاذية طويلة ممغنطة، بحيث يكون قطبها الشمالي نحو الأعلى وقطبها الجنوبي (بعيداً) نحو الأسفل فإذا قرب القطب الشمالي للإبرة من القطب الشمالي للإبرة من القطب الشمالي للمغناطيس ثم تركت الإبرة تحركت نحو القطب الجنوبي للمغناطيس راسمة خط القوة.

الطيف المغناطيسي لمغناطيس:

إذا ذرت برادة الحديد بوساطة منخل على قطعة من الورق المقوى موضوعة فوق قضيب مغناطيسي أفقي، ثم قرعت الورقة قرعات خفيفة لتتحرك ذرات البرادة على سطحها، شوهد أن هذه البرادة تتجمع على شكل خطوط منحنية تسير من قطب لآخر؛ وما هذه الخطوط إلا خطوط القوى لأن ذرات برادة الحديد تتمغنط بالتأثير، فتصير كل واحدة منها بمثابة إبرة مغناطيسية صغيرة تتجه بتأثير التحريض المغناطيسي فتنطبق على منحاه في النقطة التي تكون فيها، فتنتظم الذرات إذاً على طول خطوط القوى وترسم ما يدعى بالطيف المغناطيسي.

وعليه فالطيف المغناطيسي هو مجموعة خطوط القوى التي ترسمها برادة الحديد.

ويفيدنا الطيف المغناطيسي في دراسة المجال المغناطيسي إذ أن خطوط القوى ترسم لنا منحى التحريض في كل نقطة، كما أن تراص الخطوط وتباعدها يدلنا على

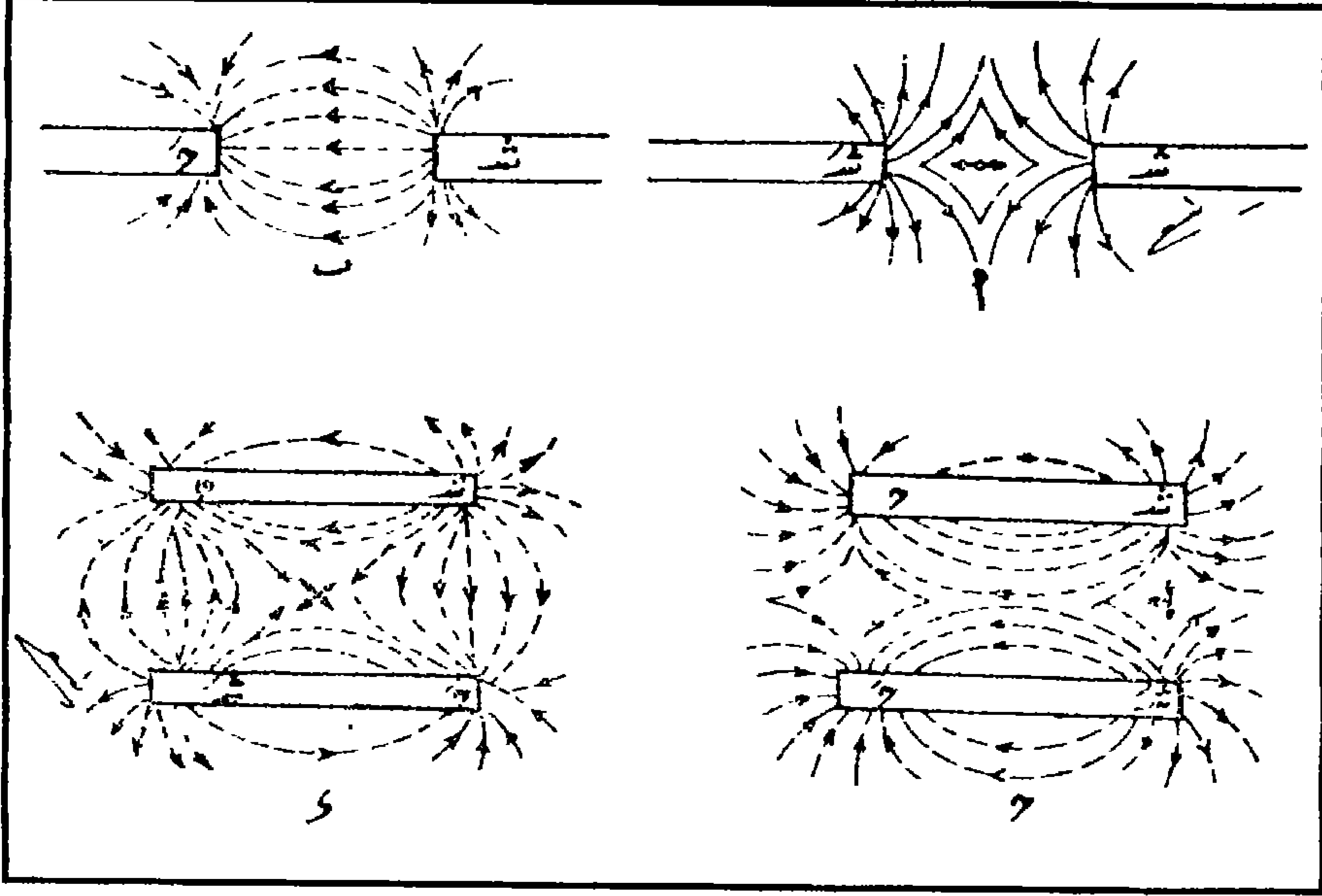
شدة التحريض المغناطيسي، فخطوط القوى متراصة في مجال تحريض مغناطيسي شديد ومتباعدة في مجال تحريض مغناطيسي ضعيف.

طيوف بعض المجالات المغناطيسية:

أ. يمثل (الشكل 17 – أ) الطيف المغناطيسي لقطبين مغناطيسيين متماثلين (شماليين) يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قصيرة.

ب. ويمثل (الشكل (17 – ب) الطيف المغناطيسي لقطبين مغناطيسيين مختلفين يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قصيرة.

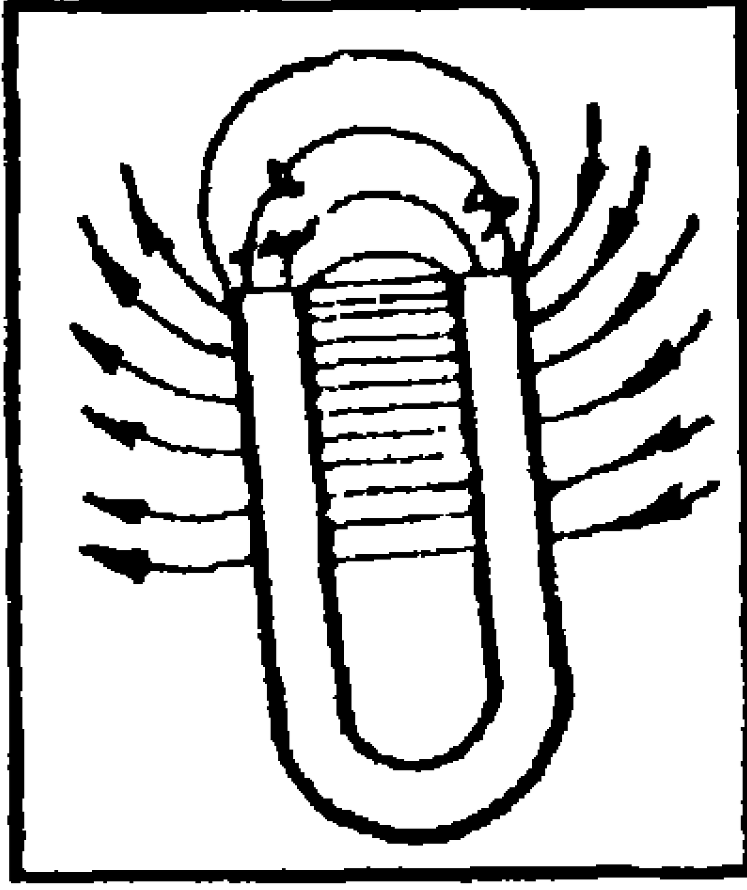
ج. ويمثل (الشكل 17 – ج) الطيف المغناطيسي لقضيبين مغناطيسيين متماثلين ومتوازيين، قطباهما المتشابهان متجاوران.



الشكل 17

د. ويبين (الشكل 17 د) الطيف المغناطيسي لقضيبين مغناطيسيين متماثلين ومتوازيين، قطباهما المختلفان متجاوران.

هـ- ويمثل (الشكل 17) الطيف المغناطيسي لمغناطيس نضوي، ويبدو في الشكل أن خطوط القوة بين فرعي المغناطيس مستقيمة ومتاوزية فمجال التحريض المغناطيسي بين الفرعين مجال منتظم، على حين تنحني خطوط القوة خارج الفرعين ولا يعود مجال التحريض منتظماً.



الشكل (18)

ملاحظة: نقطة التعادل: إذا أثر في نقطة، مجالاً تحريض مغناطيسي وكان شعاعا التحريض في هذه النقطة متعاكسين مباشرة، كان التحريض المحصل صفراً وأمكن للإبرة المغناطيسية أن تتزن في أي وضع كان، وتدعى النقطة المذكورة بنقطة التعادل. ونرى نقاط تعادل ناشئة عن مجالي التحريض المغناطيسي لمغناطيسين في كل من الشكل (17 – أ) و الشكل (17 – ج) والشكل (17 – د). وتجدر الإشارة إلى أن نقطة التعادل لقطبين مغناطيسيين من نوعين مختلفين، تقع على المستقيم الواصل بين القطبين وخارجهما، وأن نقطة التعادل لقطبين مغناطيسيين من النوع نفسه، تقع على المستقيم الواصل بين القطبين وبينهما، وتكون نقطة التعادل في الحالتين أقرب إلى القطب المغناطيسي الأضعف.

مسألة:

قضيب مغناطيسي عزمه المغناطيسي 5 وحدات عزم في الجملة الكهربائية العملية يتعامل مع مجال التحريض المنتظم.

ح = 2×10^{-3} سلا، احسب عزم المزدوجة المؤثرة به، يكرر السؤال في الحالة التي يؤلف بها المنحنى حـ شـ زاوية 150° مع منحى التحريض المغناطيسي.

الأجوبة: 0.01م × نيوتن، 0.005 م × نيوتن.

الفصل الثالث

الإنتروبيا [القصور الحراري]

ENTROPY

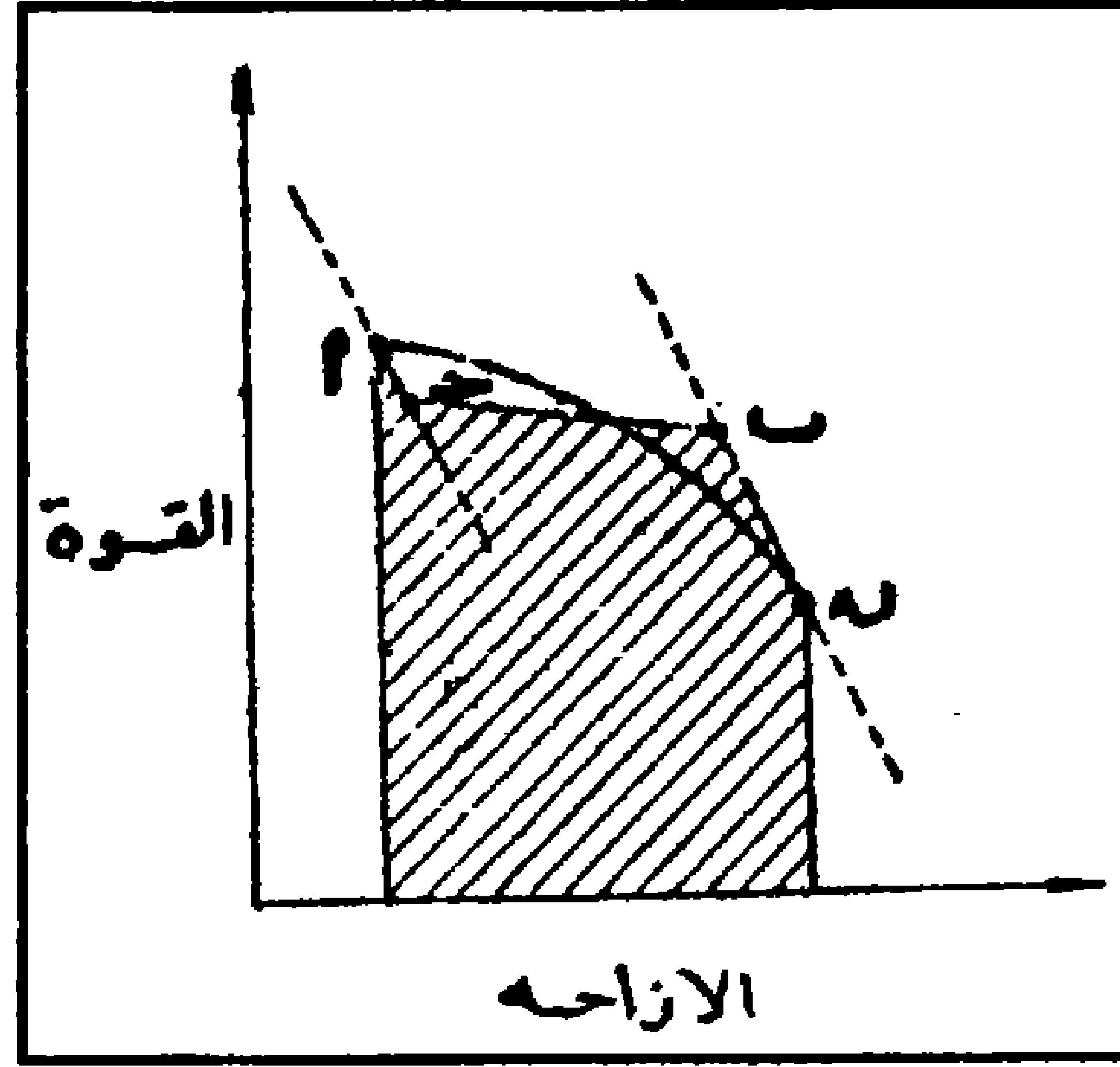
الفصل الثالث
الإنتروبيا (القصور الحراري)

هناك خصائص للآلات الحرارية أو إن شئت تعميماً للعمليات قابلة للعكس لها من الأهمية ما يجعلنا أن نصل بها وبالقانون الأول إلى حقائق علمية كثيرة سأشرح منها ما يتيسر لنرى أنه بتطبيق القانون الأول والثاني معاً، (قلت والثاني لأن هذه الخصائص تتوقف على القانون الثاني ويدخل في القانون الثاني كما سبق أن قلت تمهيداته) نصل إلى حقائق علمية في جميع فروع علم الطبيعة من الصعب الوصول إليها من غير هذا الطريق ولكن قبل أن أضرب أمثلة على ذلك سأتحدث عن الإنتروبيا إذ أنه أهم هذه الخصائص وسيكون ممثل القانون الثاني كما أن الطاقة الداخلية ستكون ممثل القانون الأول أعنى بمعرفة معادلة الإنتروبيا وبمعرفة معادلة الطاقة الداخلية وبالتلاعب بهاتين المعادلتين نصل إلى هذه الحقائق بأخصر طريق. ولكن لشرح القصور الحراري سنذكر نظرية كلوسيس Clausius Theorem.

نظرية كلوسيس:

نبدأ بالبرهنة على أنه لو كانت هناك عملية قابلة للعكس لا تتقيد درجة حرارتها بالمحافظة على قيمتها فمن الممكن دائماً أن نحللها إلى عمليات تثبت أثناءها كمية الحرارة ودرجة الحرارة على التوالي بشروط خاصة ستبين في البرهان التالي:

لنفرض أن هناك عملية قابلة للعكس تمثل على رسم يبين علاقة ما بين القوة والأزاحة بالمنحنى غير المنكسر أ ← ن (شكل 1).



شكل (1)

لتحليل هذه العملية ارسم منحنين يمران بالنقطتين أ، ن على الترتيب ويمثلان عمليتين تثبت أثناء إجرائها كمية الحرارة وليكونا المنحنين المنقطين المارين بالنقطتين المذكورتين كما في الشكل. ثم ارسم المنحنى حـ ب ليمثل عملية تثبت أثناء إجرائها درجة الحرارة بشريطة أن تتساوى المساحة التي تحت المنحنى المتواصل غير المنكسر أ ن و المساحة التي تحت المسار المنكسر أ حـ ب ن ليصبح الشغل المعمول في قطع المسارين واحد وتتكافأ العملية الأصلية مع المحللات الثلاثة أو إن شئت العمليات الثلاثة.

أعنى $ي_{(ان)} = ي_{(اجـ ب ن)}$

ولكن من القانون الأول نرى أن:

$$ح_{(ان)} = ى_{(ن)} - ى_{(ا)} + ي_{(ان)}$$

وكذلك

$$ح_{(احـ ب ن)} = ى_{(ن)} - ى_{(ا)} + ي_{(احـ ب ن)}$$

$$\therefore \quad ح_{(ان)} = ح_{(اجـ ب ن)}$$

ويمكن وضع المعادلة الأخيرة في الصورة

ح(ان) = ح(ا حـ) + ح(حـ ب) + ح(ب ن)

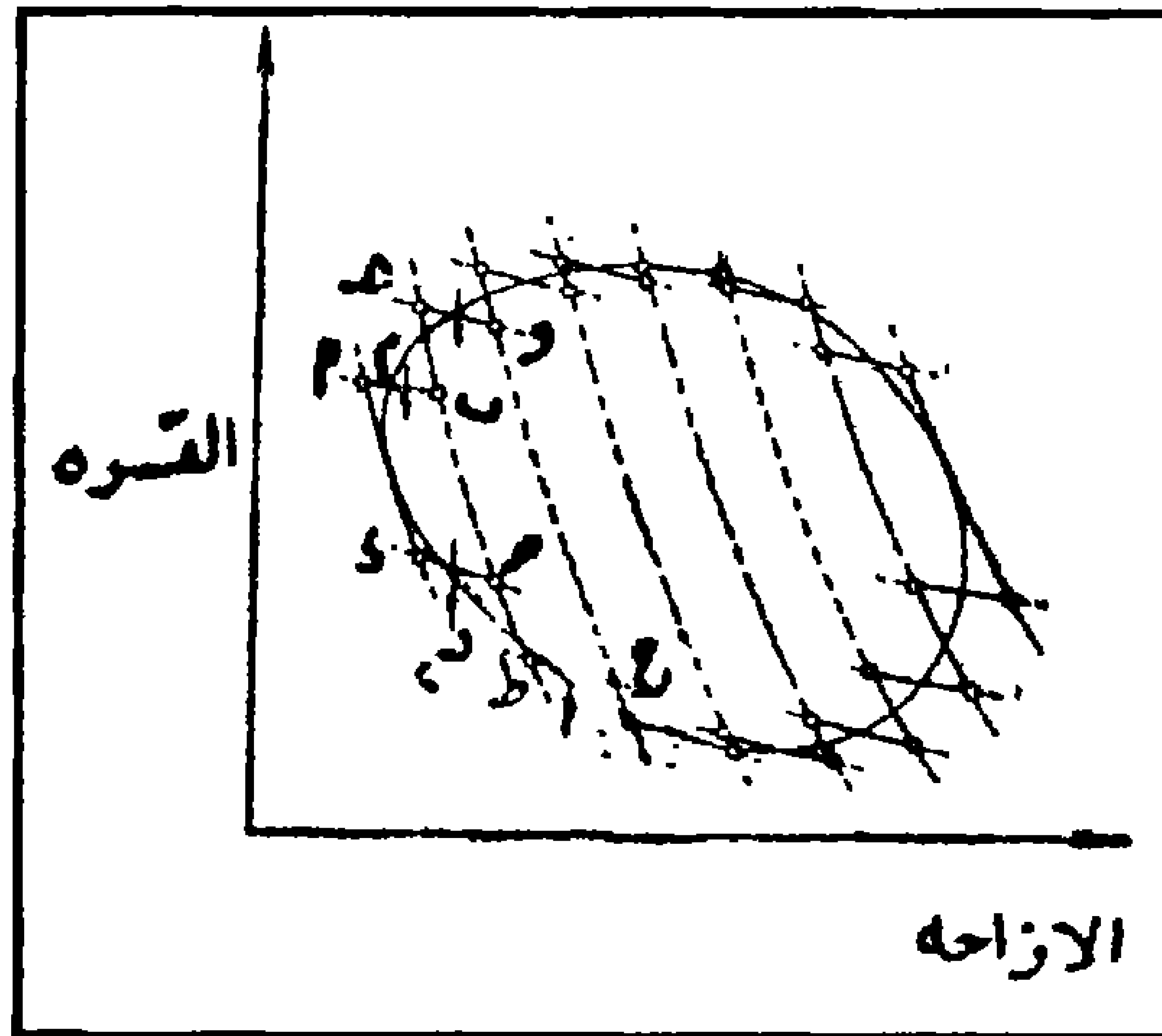
وحيث أن العمليتين المثلتين بالمنحنين أ حــ ب ن تثبت أثناء إجرائها كمية الحرارة.

اعنى ح(ا جـ) = ح(ب ن) = صفر

[لأن ح (احـ) معناها التغيير في كمية الحرارة لو تغير الوضع من أ إلى حـ]

∴ ح (ان) = ح (حـ ب)

ومعنى كل هذا أنه لو كانت هناك علمية قابلة للعكس لا تتقيد درجة حرارتها بالمحافظة على قيمتها فمن الممكن دائماً أن نحللها إلى ثلاثة عمليات تثبت أثناءها كمية الحرارة ثم درجة الحرارة ثم كمية الحرارة على الترتيب على شريطة أن الحرارة المنقولة أثناء العملية ثابتة درجة الحرارة تساوي الحرارة المنقولة أثناء العملية الأصلية لننتقل الآن خطوة إلى الأمام ولنفرض وجود منحنى مقفل متواصل غير المنكسر يمثل علاقة ما بين القوة والإزاحة لدورة قابلة للعكس كما في شكل (2).



الشكل (2)

وبما أنه من السهل البرهنة على عدم تقاطع منحنيين تثبت فيهما كمية الحرارة [ويكفي أن نفرض أنهما يتقاطعان ثم نكمل الدورة بعمل منحنى تثبت فيه درجة الحرارة ثم نبرهن على أن هذه الحلقة لا تتفق والقانون الثاني] إذن يمكننا أن نرسم

منحنيات غير متقاطعة من هذا النوع لنقسم المنحنى المقفل إلى عدد كبير من الأشرطة المتجاورة ولكل شريط حدود أربع، حدان من الحدود عبارة عن منحنيين تثبت فيها كمية الحرارة كما رأينا أما الحدان الآخران فهما منحنيان يكادان ينطبقان على حدود المنحنى المقفل وهما أجزاء من منحنيين تثبت فيها درجة الحرارة أو بعبارة أوضح نقسم المنحنى المقفل إلى عدد كبير من حلقات كارنوت فيصبح عوضاً عن المنحنى المتواصل المقفل منحنياً مقفلاً منكسراً متكوناً من أجزاء من منحيات ثابتة كمية الحرارة ودرجة الحرارة على التوالي؛ ولأجل أن يتكافأ الشغل المعمول في كلا المسارين المنكسر والمتواصل يجب أن تكون الحرارة المنقولة أثناء الأجزاء التي تثبت فيها درجة الحرارة تساوي الحرارة المنقولة في الدورة الأصلية [أقصد بالحرارة المنقولة الحرارة المأخوذة أو الحرارة المقذوفة على حد سواء].

لنبحث الشريط الأول أو الحلقة الأولى من حلقات كارنوت أ ب جـ د

ترى أن $\frac{ح_1}{د_1} = \frac{ح_2}{د_2}$ علماً بأن د = د

وإذا جعلنا الحرارة المأخوذة موجبة والحرارة المقذوفة سالبة أمكننا أن نكتب المعادلة السابقة في الصورة: $\frac{ح_1}{د_1} + \frac{ح_2}{د_2}$ = صفراً حيث $ح_1$ موجبة، $ح_2$ سالبة.

لنبحث الآن الشريط الثاني أو حلقة كارنوت هـ و ح ط نجد أن:

$\frac{ح_3}{د_3} + \frac{ح_4}{د_4}$ = صفراً

وإذا كتبنا لكل شريط معادلته وأضفنا جميع المعادلات فإن النتيجة تصبح:

$\frac{ح_1}{د_1} + \frac{ح_2}{د_2} + \frac{ح_3}{د_3}$ + ... = صفراً

أي أن مجـ $\left(\frac{ح}{د}\right)$ ... ... = صفراً

حيث أن الجمع يؤخذ على الحلقة المنكسرة جميعها إذ لا تنقل الحرارة في العمليات التي تثبت فيها كمية الحرارة من أجزا ءالحلقة المنكسرة.

ويمكننا أن نرسم مساراً منكسراً يشابه تماماً الحلقة الأصلية ويمكننا أن نقربه إلى الحقيقة ليطابق ما أمكن الحلقة تمام المطابقة وذلك بقسمتها إلى عدد كبير جداً من الشرائط بالطريقة سالفة الذكر، إذ نرسم عدداً كبيراً جداً من ثابتي كمية الحرارة بجوار بعضها وتوصل هذه المنحنيات بثابتي درجة الحرارة كما شرحنا وفي هذه الحالة تبصح النسبة $\frac{د ح}{د}$ لجزء صغير من ثابت درجة الحرارة المحصور بين ثابتين متجاورين من كمية الحرارة تساوي $\frac{د ح}{د}$ لجزء صغير جداً من الحلقة الأصلية محصور بين نفس الثابتين المتجاورين من كمية الحرارة.

وفي النهاية يمكننا أن نكتب للحلقة القابلة للعكس.

$$\oint \frac{د ح}{د} = \text{صفراً} \quad .... (1)$$

وهذه النتيجة الأخيرة تسمى نظرية كلوسيس.

هذه المعادلة عامة ولكنه يمكننا أن نثبتها في حالة خاصة ومن طريق آخر وهذه الحالة هي حالة الغاز الكامل. أما الطريق فهو القانون الأول.

$$د ح = ى\ د\ د + ص\ د ح$$

$$= ى\ د\ د + \frac{ر\ د}{ح}\ د ح \quad [\text{لأن } ر\ د = ح\ ص]$$

نلاحظ أن $\frac{1}{د}$ هو معامل التكامل،

$$\text{وعليه} \quad \frac{د ح}{د} = \frac{ى د د}{د} + \frac{ر\ د ح}{ح}$$

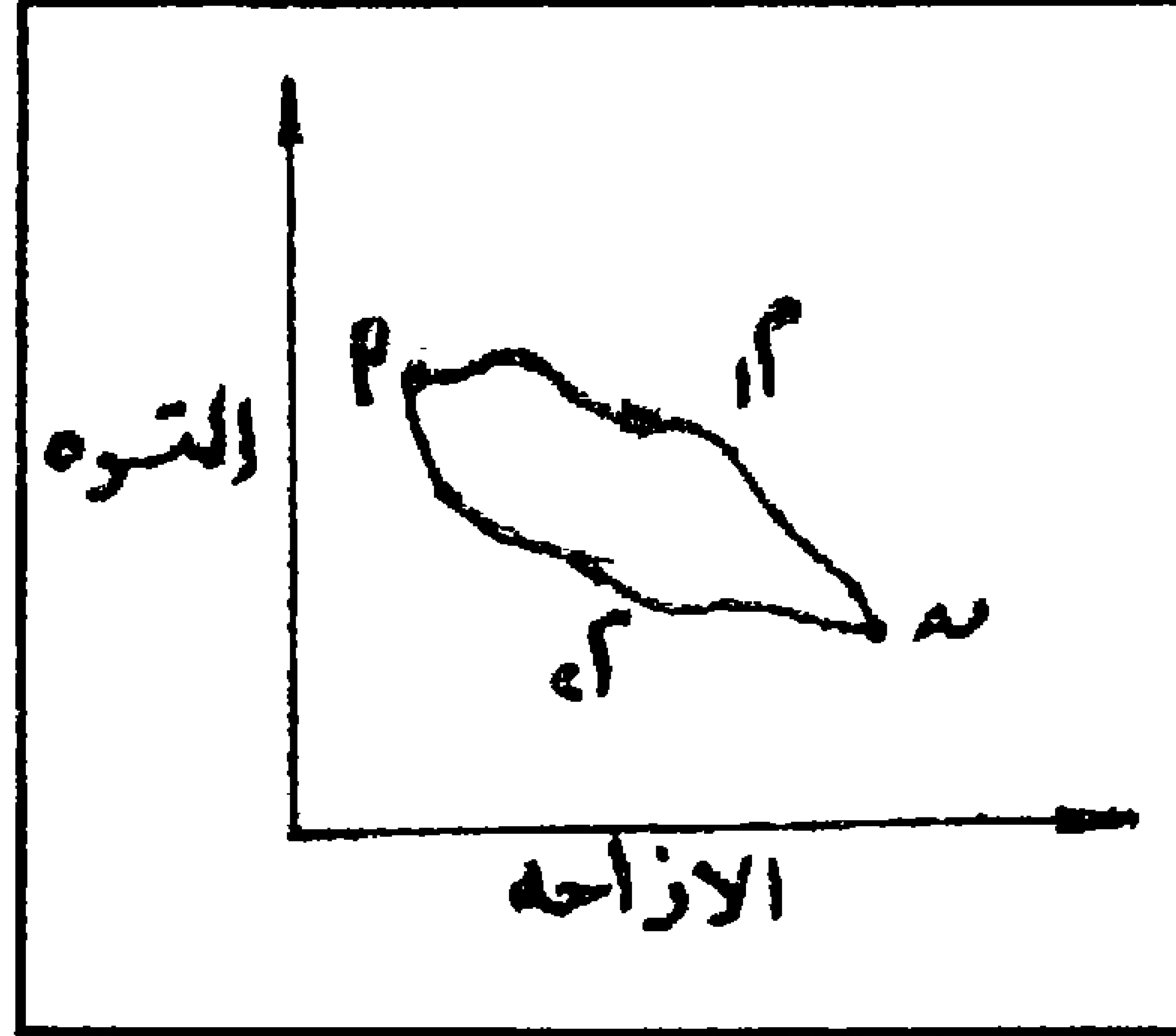
$$\therefore \oint \frac{د ح}{د} = \text{لة}\ (د) + \text{له}\ (ح)$$

= صفرا لحلقة كاملة قابلة للعكس حيث أن د، ح تحتفظ في نهاية الأمر بقيمتها الابتدائية.

ويلاحظ أن $\frac{دح}{د}$ دالة موضع تتوقف على الحال ولا تتوقف على المسار لأن لـة (د)، له (ح) دالتا موضع والطرف الأيمن لابد أن يكون من نوع الطرف الأيسر.

تعريف الإنتروبيا (القصور الحراري):

دع النقطة أ تمثل وضعا ابتدائياً في حالة اتزان لمجموعة ما كما في الشكل (2).



الشكل (3)

يلاحظ أنه من الممكن أن تأخذ المجموعة من أ إلى ن في عدد كبير من المسارات القابلة للعكس حيث أن أ، ن كل في حالة اتزان.

لنفرض أننا أخذنا المجموعة من أ إلى ن في المسار القابل للعكس $م_1$ وارجعناها ثانية في المسار القابل للعكس $م_2$، ومن البديهي أن نعتبر المسارين معاً حلقة قابلة للعكس وعليه يمكننا أن نطبق نظرية كلوسيس وينتج أن:

$$\oint_{م_1 م_2} \frac{دح}{د} = صفراً$$

ويمكن تحليل هذا التكامل إلى تكاملين أحدهما للمسار $م_1$ والآخر للمسار $م_2$.

أعني

$$\text{م}_1 \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}} + \text{م}_2 \int_{\text{ن}}^{\text{أ}} \frac{\text{دح}}{\text{د}} = \text{صفرا}$$

أو $\text{م}_1 \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}} = - \text{م}_2 \int_{\text{ن}}^{\text{أ}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$

وحيث أن م_2 مسار قابل للعكس

$$\therefore - \text{م}_2 \int_{\text{ن}}^{\text{أ}} \frac{\text{دح}}{\text{د}} = \text{م}_2 \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$$

بتطبيق هذه النتيجة على المعادلة السابقة نرى أن

$$\text{م}_1 \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}} = \text{م}_2 \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$$

وحيث أن م_1، م_2 أي مسارين قابلين للعكس فلابد أن يكون التكامل

$\text{م} \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$ مستقلاً عن المسار الموصل بين أ، ن.

ومعنى هذا أن هناك دالة موضع، تتوقف على الحال ولا تتوقف على المسار، قيمتها النهائية مطروحاً منها قيمتها الابتدائية تساوي $\text{م} \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$.

ولقد رأينا أن أنسب تسمية لهذه الدالة هي الانتروبيا (القصور الحراري) وسنرمز لها بالرمز ے.

فإذا كانت ے أ هي الانتروبيا (القصور الحراري) في الوضع الابتدائي، ے ن هي الإنتروبيا (القصور الحراري) في الوضع النهائي فإنا نرى أن التغيير في الإنتروبيا.

$$\text{ے}_{\text{ن}} - \text{ے}_{\text{أ}} = \text{م} \int_{\text{أ}}^{\text{ن}} \frac{\text{دح}}{\text{د}}$$

وأخيراً إذا كان الوضعان الابتدائي والنهائي قريبين إلى بعضهما قرباً متناهياً فمن الجائز أن نحذف علامة التكامل ونضع التغير في الإنتروبيا (القصور الحراري) في الصورة الآتية:

$$\text{د ے} = \frac{\text{دح}}{\text{د}}$$

وعليه فلتغير قابل للعكس تتوقف ء ـ على التغير الكلي للحال وليس على طريق التغير، وفي هذه الناحية هي كالطاقة وبديهي أن التغير في الإنتروبيا يساوي صفراً في العمليات التي تثبت فيها كمية الحرارة.

زيادة الانتروبيا (القصور الحراري):

لقد تحدثنا عن الحرارة المختفية أثناء الدوران في حلقة قابلة للعكس وذهبنا إلى أنها تستعمل جميعها في إحداث قوى ميكانيكية يمكن استخدامها في إحداث شغل خارجي، هذا على فرض عدم وجود قوى احتكاك. ولكن إذا ظهر في الميدان القوى الاحتكاكية، لو ظهرت هذه القوى فإن بعضاً من الطاقة الميكانيكية الحادثة تستعمل في التغلب عليها، ونتيجة ذلك تحول هذا البعض إلى حرارة. والسؤال المتبادر إلى الذهن، هل الحرارة الناتجة عن قوى الاحتكاك قابلة للعكس؟ والجواب على ذلك أنها تفقد ولا تعكس، فإذا عكسنا اتجاه الدوران في الحلقة، ظهرت قوى الاحتكاك جديدة، إذ إنها تعمل دائماً لتعوق الحركة الأصلية، فكأننا وقد عسكنا لم نرجع حرارة مفقودة بل أفقدنا حرارة جديدة نتيجة لظهور قوى احتكاك وعليه تقل الكفاية لآلة تظهر فيها قوى الاحتكاك، أعني لآلة غير قابلة للعكس عن أخت لها تدور في نفس الحلقة، وتعمل بين نفس درجتي الحرارة ولا تظهر فيها قوى الاحتكاك، أعني عن آلة قابلة للعكس.

$$\therefore \frac{\text{ح}_1 - \text{ح}_2}{\text{ح}_1} < \frac{\text{د}_1 - \text{د}_2}{\text{د}_1} \quad [\mathbf{\text{د}} = \text{د}]$$

$$\text{أعني} \quad \frac{\text{ح}_1}{\text{د}_1} - \frac{\text{ح}_2}{\text{د}_2} < \text{صفر}$$

ومعنى هذا أن التغير في الانتروبيا (القصور الحراري) أقل من الصفر، أو بعبارة أخرى هناك زيادة في الإنتروبيا (القصور الحراري) وذلك لحلقة غير قابلة للعكس. والمعادلة العامة لأي حلقة غير قابلة للعكس هي:

$$\oint \frac{\text{دح}}{\text{د}} < \text{صفر}$$

ومعنى هذه المعادلة أيضاً، أنه في كل عملية دائرية غير قابلة للعكس، هناك زيادة في الإنتروبيا، وفي الحقيقة لا توجد آلة حرارية قابلة للعكس تماماً، لذا كانت الكفاية دائماً أقل من الكفاية النظرية.

ولقد رأى كلوسيس أن الطاقة في هذا العالم دائمة التحول والتغير، وفي أثناء هذا التحول تفقد بعضاً منها أو بعبارة أخرى رأى أن العمليات الكونية عمليات غير قابلة للعكس تماماً، مما حدا به إلى أن قال: "إن الإنتروبيا (القصور الحراري) لهذا العالم تتجه نحو العناية العظمى".

الفصل الرابع

أُطر الإسناد والأثير

Frames of Reference & the Ether

الفصل الرابع

أطر الإسناد والأثير

Frames of Reference and the Ether

النظرية النسبيّة ونظرية الكمّ، اللتان وُلدتا في السنوات الخمس الأولى من القرن العشرين، قد عمّقتا معاً ولدرجة كبيرة فهمنا للطبيعة. وبالطبع، فإنّ هذا القول يصدق على أية نظرية هامة للطبيعة. غير أن هاتين النظريتين الجديدتين تفرّدتا بشيء يرمز إلى تبدل في العلاقة بين العلْم والخبرة الإنسانية. فقد أسهمت كل منهما في إحداث ثورة تامة في نظرة كل من العالِم والفيلسوف إلى الكوْن. فلأوّل مرةٍ في تاريخ العلم، ان مفاهيم الفيزياء الحديثة لا تدرك مباشرة استُحدثت مفاهيم عارضت الفطرة السليمة وتحدّت التخيّل. وليس الإنسانُ اليوم، بعد انقضاء جيلين، بأقدر على تصور الزمكان الرباعيّ الأبعاد Spacetime والطبيعة الموجيَّة – الجسيميّة للفوتون منه عندما استُحدثت هذه الأفكار. أما سببُ ذلك، فلا يصعُب العثور عليه. فنحن بني البشر، مخلوقاتٌ كلاسيكية، وعلْمُ ما قبل القرن العشرين يكفي تماماً لوصفنا من ناحية عامة. ونظرية الكم(*) لا تعنينا إلا على المستوى المجهري البيوكيميائي biochemical دون مدى إدراكنا، والنسبية كذلك لا أهمية لها في الحياة العادية لأننا نتحرك، حتى في الطيران النفاث، بسرعاتٍ تقلُ كثيراً عن سرعة الضوء ومع ذلك فان للنظريات الجديدة تأثيرات عملية. وعلى الرغم من ذلك، فإنك ستجد، وأنت تستكشف حدود الصغير جداً والسريع جداً في هذا المجلد، أن عطاء هاتين النظريتين الجديدتين يتعدّى كونه إثارة ذهنية محضة أو تحدّيا عقلياً بحتاً. ومع أن مفاهيمهما نائية وبعيدة إلا أنهما قد انتجتا وفرةً من النتائج العمليّة.

(*) نظرية الكم أو النظرية الكوانتية.

النسبية واللامتغيرية Relativity and invariance:

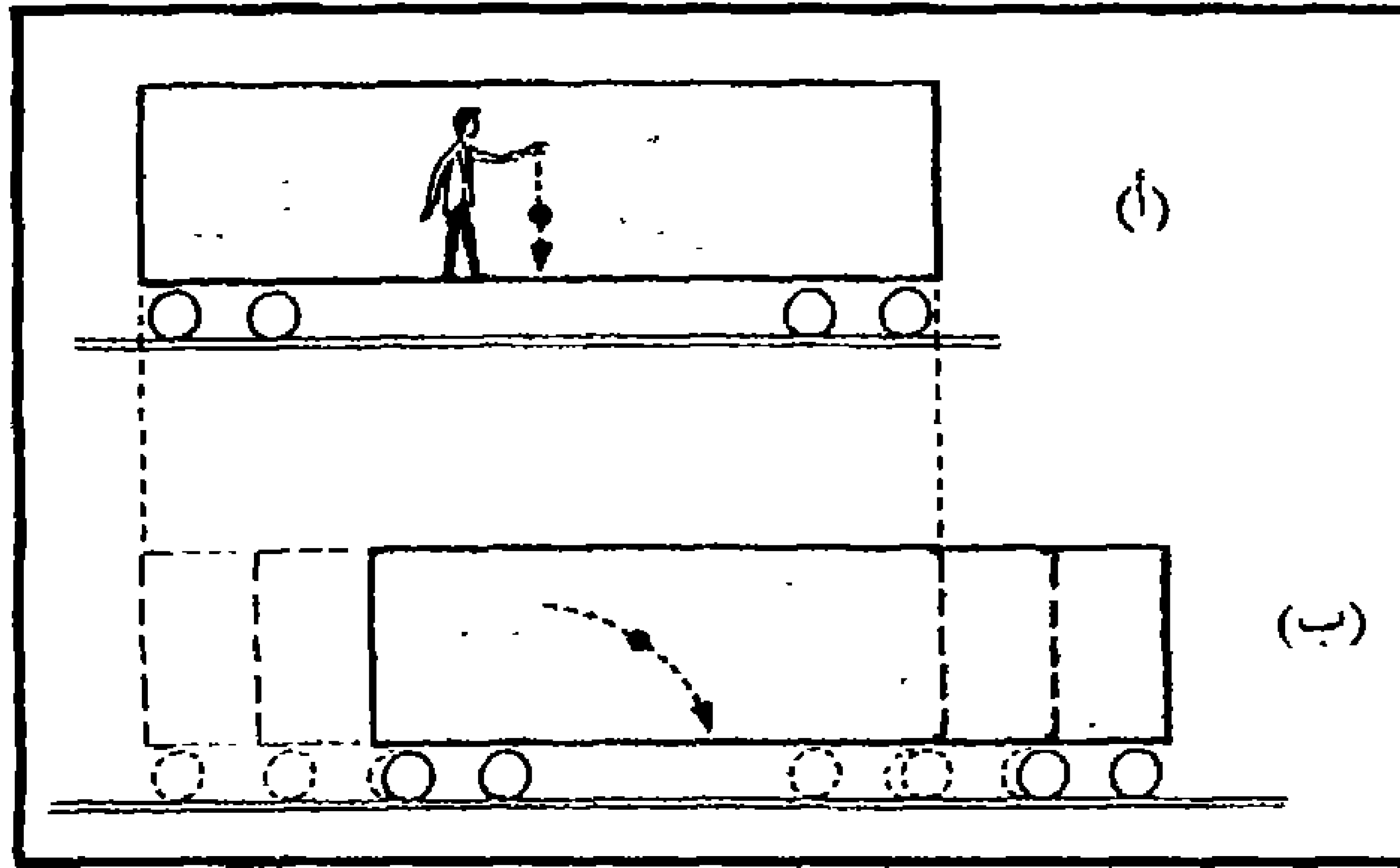
تُعْنى النظرية النسبية بفكرتين متعارضتين ظاهرياً، النسبية واللامتغيريّة. وتعني النسبية هنا نسبية الملاحظة، فأنا أرى ظاهرة معينة بطريقةٍ ما، وأنت تراها بأخرى، وهي تشير إلى الاختلاف. أما اللامتغيرية فتشير إلى مواطنِ الاتفاق، أي إلى تلك الجوانبِ من الظاهرةِ (وأهمُّ من ذلك قوانين الظواهر تلك) التي تبدو واحدة لملاحظين مختلفين observers. ويمكننا بدلاً من النسبية واللامتغيرية أن نستخدم الذاتية subjectivity والموضوعية objectivity. وعلى أية حال، فذاتيةُ النسبية هي نوعٌ معينٌ من الذاتية الفيزيائية، ولا تدلُّ على مجرد الاختلافات في الإدراكِ الإنساني. كذلك فإن موضوعيّة النسبية ليست هي الحقيقة الموضوعية التي يعنيها الفلاسفة، بل إنّها موضوعيةٌ بالتعريف، أي اتفاقُ الملاحظين على اعتبار أنّ الجوانب المشتركة من قياساتهم حقيقةٌ واقعة.

ومما يثير الدهش أن النظرية النسبيّة قد أضافت إلى العلم المزيد من النسبية (أو الذاتية) والمزيد من اللامتغيرية (أو الموضوعية). فقد بيّن آينشتاين أن عدداً من الكميّات التي كان يُظنُ سابقاً بأنّها لا متغيرة invariant هي في الواقع نسبيّة، ومن أبرز هذه الكميات الزمن. ولكنه في الوقت نفسه بين لنا كيف نستخلص كمياتٍ لا متغيرة جديدة من الزيادة في نسبية الملاحظة. والأهمّ من ذلك كله، أنه رفع إلى مرتبة المسلمات العلمية الأساسية المبدأ القائل إنّ القوانين التي تحكم الظواهر، على الرغم من نسبية الملاحظات الخام لها، يجب أن تكون لا متغيّرة. فمن الزيادة في ذاتية subjectivity الملاحظة التي جلبتها معها النظرية النسبية انبثقت وجهةُ نظرٍ جديدة وأكثرُ عمقاً بشأن موضوعيّة القوانين الفيزيائية.

نسبية غاليلو Galilean relativity:

إنّ فكرتي النسبية واللامتغيرية موجودتان في ميكانيك نيوتن العادية، ويمكنُ توضيحهما بتجارب ميكانيكية بسيطة، وسيكون هدفنا في هذا الجزء والجزء الذي يليه استعراضُ النقاش الذي ورد في ذلك الجزء السابق وتوسيعه. اعتبر، مثلاً ولداً في قاطرة تتحرك بانتظام، يُفلت من يده كرة ويدعُها تسقط مباشرة إلى أسفل. فمن وجهة نظره، تبدأ الكرةُ من السكون، وتسقط رأسياً إلى أسفل بتسارعٍ منتظم. أمّا بالنسبة لمشاهدٍ خارج القطار، فسوف تكون له وجهةُ نظرٍ مختلفة (الشكل 1)، وسوف يقولُ إنّ المسار "الفعلي" للكرة في فراغ القاطرة هو قطعٌ مكافئ parabola، فللكرةِ عند إفلاتها حركةٌ إلى الأمام، وهي تسقطُ لذلك كقذيفة في قوس قطعٍ مكافئ. غير أنّه، مع ذلك، سوف يسلّم بأن الولد مصيبٌ في تعيين تسارعٍ سفلي منتظمٍ للكرة، ولسوف يتفق الإثنان حقاً على مقدار هذا التسارع. ويمكننا تلخيصُ مواطِن الاتفاق والاختلاف بين الملاحظين في جدول قصير. (لاحظ ان هذا الجدول يتعلق بميكانيك نيوتن وأنه يجب تغييره عندما نتطرق إلى ميكانيك آينشتاين الجديدة).

نقاط الاتفاق	نقاط الاختلاف
التسارع	الموضع
الكتلة	السرعة المتجهة
القوة	الإحداثيات
الزمن	
قوانين الحركة	



الشكل 1

نسبية الملاحظة في ميكانيك نيوتن:

أ. في إطار إسناد مثبت بالقطار، تسقط كرة رأسياً إلى أسفل

ب. في إطار إسناد يرتكز على الأرض، تبدو نفس الحركة كقطع مكافئ parabolic. ويتفق الملاحظان على بعض جوانب الحركة ويختلفان في جوانب أخرى).

وثمة اختلاف بين على الموضع نظراً لوجود اختلاف على شكل المسار. كذلك يوجد اختلافٌ بين على السرعة المتجهة velocity، لأنّ الملاحِظ الخارجيّ يعتبرُ أنّ للكرة مركبة سرعةٍ أفقية، بخلافِ الملاحظ الداخلي، الذي يعتبر أن للكرةِ سرعة متجهة رأسية فقط. وهنالك أيضاً اختلاف ممكن على الإحداثيات، وهو أمرٌ لا يرتبطُ بالضرورة بالحركة النسبية للملاحظين. فأي ملاحظين يمكنهما دوماً اختيارُ نظامين مختلفين من الإحداثيات ينسبان إليهما قياساتهما.

وبالرغم من الاختلافات، تظلُّ هناك أرضيةُ اتفاقٍ كبيرةٌ بين الملاحظيْن. فكلاهما سوف يقيس نفس التسارع، ذلك لأنه لا يوجد تسارعٌ نسبي بين الملاحظين. ويفترض في الميكانيك أن الكتلة والزمن كميتان لا متغيرتان محددتان، ولو كان الأمر على خلاف ذلك، لتزعزعت نظرية الميكانيك إلى درجة كبيرة، (كما تزعزعها حقاً النظرية النسبية). ومن ناحية تجريبية فإن أوزان مسافري القطارات لا تتغير، مما يدلّ على أن

كلا الملاحظيْن يقيس نفس القوة(*). والأهم من ذلك كله، أن مسافر القطار (الذي يفضل الآن أن يكون عالماً ولا ولداً)، إذا ما استكمل تجربة إسقاط الكرة بتجارب أخرى عديدة، فإنّه سوف يتوصل إلى قوانين نيوتن، وهي تماماً القوانين التي يعرفُ الملاحظ الخارجي أنها صحيحة في الإطار الساكن خارج القطار.

إن حقيقة اتفاق الملاحظين في أطرِ إسنادٍ قصورية مختلفةٍ على قوانين الحركة تعرف بنسبة غاليلو(**). وتعني هذه النسبية أن الأرض ليست بمختبرٍ أفضل أو أسوأ من القطار، وأن للعالِم المسافر نفس حق العالم الواقف على الأرض في ادّعاء أنه هو الساكن وأن الآخر هو المتحرك. إن لا متغيرية قوانين الحركة تحول دون اعتبار أي إطار إسنادٍ مفرد كإطار مفضل للميكانيك، وهي بذلك تنفي الحركة المطلقة.

تحويل غاليلو The Galilean transformation:

لا يكفي أن نعرف أن الملاحظ المسافر والملاحظ الساكن يقيسان مواضع وسرعاً متجهة مختلفة لنفس الكرة المتحركة، بل نحتاجُ إلى معرفة كيفية اختلافهما، أي نحتاجُ إلى التعبير عن الاختلاف بينهما كمياً. وذلك أمرٌ يسهل عمله. وبصورة عامة، فإن مجموعة العلاقاتِ الرياضية التي تربطُ قياسات ملاحظٍ بقياسات ملاحظٍ آخر تدعى تحويلاً transformation. وفي الميكانيك الكلاسيكية يدعى تحويل قياسات المكان والزمان من ملاحظ إلى آخر يتحرك بانتظام بالنسبة له بتحويل غاليلو Galilean transformation. وبداعي البساطة، سنركز اهتمامنا على الحركة في مستوٍ، ونفرض أن ملاحظنا المسافر يقيس مسافات أفقية س إلى الأمام من مؤخرة القطار ومسافات رأسية ص إلى أعلى من أرضية القطار (الشكل 2) في حين أن الملاحظ على الأرض يقيس مسافاتٍ أفقية

(*) في صياغة منطقية ممكنة للميكانيك، تعرف القوة بحاصل ضرب الكتلة في التسارع. وفي هذه الحالة، فإن لا متغيرية كل من الكتلة والتسارع تعني تلقائياً لا متغيرية القوة. أما في الصياغة المنطقية الاخرى، حيث تعرفُ القوة على حدة، فيجب التأكد بالتجربة من لا متغيريتها.

(**) الفيزياء الكلاسيكية والحديثة، المجلد الأول، مجمع اللغة العربية الأردني، 1981.

س من عمود ثابت أ على الأرض ومسافات رأسية ص إلى أعلى من منصة في مستوى أرضية القطار. ولذا، فإن القياسين ص و صَ سوف يتطابقان. ويجب افتراض تطابق قياسي الزمن نـ و نـ إذا كان الملاحظان يحملان ساعتين مضبوطتين، (وهو افتراضٌ سنضطر قريباً إلى تغييره). أما س و سَ فهما القياسان اللذان يختلفان فيهما. فإذا مرت مؤخرة القطار بالعمود أ عند نـ = صفر، فإنها تكون قد تحرّكت إلى الأمامِ فيما بعد مسافة تساوي ف = سر نـ، حيث سر هي سرعة القطار. ومن الواضح من الشكل 2 أن س و سَ تختلفان عن بعضهما بعضاً بهذه المسافة ف. ولذلك، يمكن كتابة تحويل غاليلو كمجموعة من ثلاث معادلات على النحو التالي:

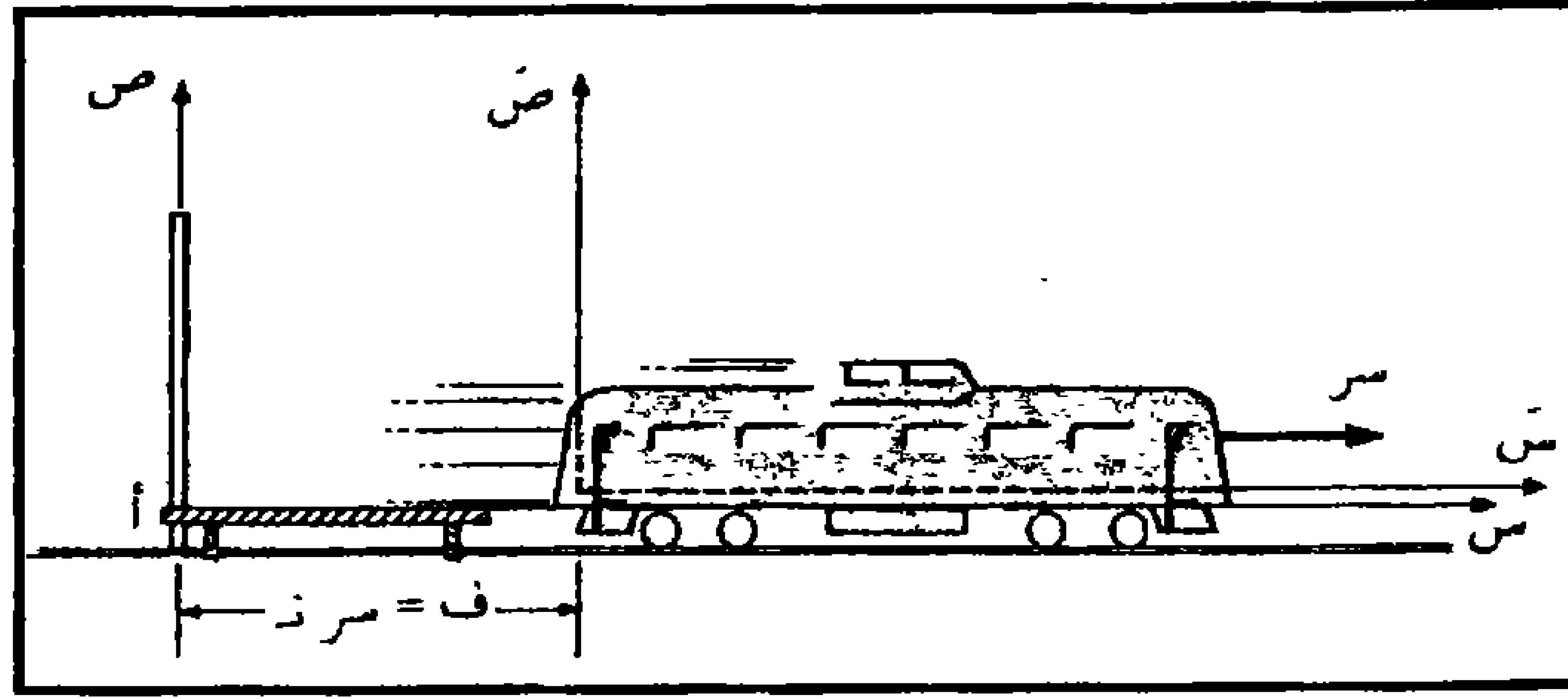
س = سَ + سر نـ .... (1)

ص = صَ .... (2)

نـ = نَـ .... (3)

وفي كلّ من هذه المعادلاتِ الثلاثِ نجدُ على اليسار قياساً (أو أكثر) للملاحظ على القطار، في حين نجد على اليمين قياساً للملاحظ على الأرض. وبذلك يكون لدينا تحويل من سَ، صَ، ونـَ إلى س، ص، ونـ. وبالطبع فهذا التحويل، وبقدرٍ مساوٍ، تحويل أيضاً في الاتجاه الآخر. وإذا اتفق الملاحظان على جعل محوريهما س ص وسَ صَ في نفس المستوى، فإنهما سوف يتفقان على الإحداثيات العمودية على هذه المستوى، وعندها نستطيع إضافة معادلةٍ رابعةٍ إلى المعادلات الثلاث السابقة لإكمال التحويل:

ع = عَ .... (4)



الشكل2

تعريف الإحداثيات في إطاري إسناد

مثال1:

إذا أسقطت الكرة في الشكل 1 عند نـ = صفر من ارتفاع عـ فوق الأرض ومسافة س. من مؤخرة العربة، فما المعادلات التي تصف حركتها بالنسبة للملاحظين؟

تربط معادلات تحويل غاليلو مجموعتي المشاهدات، إلا أنها لا تزودنا بأي منهما. ومن أجل ذلك، يجب استخدام قوانين الحركة. وفي هذا المثال، تسقط الكرة رأسياً بتسارع g في إطار الإسناد المثبت بالقطار، وتحدد حركتها في هذا الإطار بالعلاقتين التاليتين:

$$سَ = س_{\circ}$$

$$صَ = عـ - \frac{1}{2} g\ نـ^2$$

$$= عـ - g \frac{1}{2} نـ^2$$

وبتعويض المعادلتين هاتين في المعادلتين 1 و 2 نحصل على وصف الحركة في إطار الإسناد المثبت بالأرض:

$$س = س_{\circ} + سر\ نـ$$

$$ص = عـ - \frac{1}{2} g نـ^2$$

وبضم هاتين المعادلتين معاً لحذف الزمن نـ، نحصل على النتيجة التالية:

$$ص = عـ - \frac{ل}{2 سر^2}(س - س_0)^2$$

وهذه هي معادلة قطع مكافئ:

ويفـرض أن الإحـداثيات س، ص، ع، وسَ، صَ، عَ هـي إحـداثيات جسـم متحرك، فمن الممكن مفاضلة معادلات التحويل بالنسبة للزمن للحصول على تحويـل السرعة المتجهة:

$سر_س = سرَ_س + سر$ .... (5)

$سر_ص = سرَ_ص$ .... (6)

$سر_ع = سرَ_ع$..(7)

وتبين هذه المعادلات نسبية غاليلو للسرعة المتجهة. لاحـظ أن سـر هـي السـرعة النسبية لأطاري الإسناد، في حين أن سرس، سـرَس وهلـمّ جـرا تشـير إلى مركبـات السرعة المتجهة لجسم يلاحظ في كلا الإطارين. وتعطينا مفاضلة أخرى للمعـادلات 5 وحتى 7 ما يلي:

$ت_س = تَ_س$ .... (8)

$ت_ص = تَ_ص$ .... (9)

$ت_ع = تَ_ع$ .... (10)

مما يؤكد لا متغيرية التسارع للملاحظين.

إن مفهوم الحدث event هام في النظريـة النسـبية. ومتـوقعين حاجتنـا إليـه فإننـا نعـرض فكرتـه هنـا. إن الحـدث نقطـة في المكـان والزمـان، وهـو في العـادة (ولـيس

بالضرورة) شيء يقع happening or occurrence في مكانٍ معين وزمان محدد. فبدء سقوط الكرة في الشكل 1 حدثٌ، وارتطامها بالأرض حدثٌ آخر. ويشار إلى الفاصل separation المكاني والزماني بين حدثين بالرموز Δ س، Δ ص، Δ ع، Δ نـ، حيث Δ س = $س_2 - س_1$، Δ ص = $ص_2 - ص_1$، وهلّم جرا. وترتبط هذه المسافات والأزمنة بين حدثين بتحويل غاليلو على النحو التالي:

Δ س = Δ سَ + سر Δ نـ .... (11)

Δ ص = Δ صَ .... (12)

Δ ع = Δ عَ .... (13)

Δ نـ = Δ نَـ .... (14)

وبالرغم من أن هذه المعادلات تبدو إلى درجة كبيرة كالمعادلات 1 – 4، إلا أنها في الواقع أعمّ منها. فهي تتطلب فقط أن تكون المحاور س، ص، وع موازية للمحاورِ سَ، صَ، وعَ على الترتيب، وأن تكون الحركة النسبية لاطاري الإسناد في اتجاه س. وليس من الضروري أن يكون المحوران س و سَ واقعين على الخط نفسه، كذلك من غير الضروري أن يمر مركزاً نظامي الإحداثيات: أحدهما بالآخر، في أيةِ لحظة زمنيةز

مثال2:

الحدث 1 هو سقوط الكرة من الارتفاع عـ في الشكل 1 والحدث 2 هو ارتطامُها بالأرض. ما الفاصل المكاني والزماني بين هذين الحدثين لكل من الملاحظَيْن؟

الإزاحة الرأسيةُ للكرةِ هي: ص 2 – ص 1 = - عـ وإزاحتُها العرْضية transverse (في اتجاه ع) هي صفر. لذلك، فإنّ:

Δ ص = Δ صَ = - عـ

Δ ع = Δ عَ = صفر

أما زمن سقوطها فهو واحدٌ أيضاً في الإطارين:

$$\Delta \text{ نـ} = \Delta \text{ نـَ} \sqrt{\frac{2 \text{ عـ}}{g}}$$

وفي القطار، لا تعاني الكرة أيّة إزاحةٍ في اتجاه المحورِ س، لذلك، فإنّ:

Δ سَ = صفر

وبمساعدة المعادلتين 15، و 16 تعطينا المعادلة 11 ما يلي:

$$\Delta \text{ س} = \text{سر} \sqrt{\frac{2 \text{ عـ}}{g}}$$

إن غرضنا من تقديم هذا المثال ليس لأجل تعلم شيء جديدٍ عن الكرات الساقطة، بل لاستثارة طريقة في التفكير في الأحداثِ والملاحظين مفيدة بحد ذاتها في النظرية النسبية.

مثال3:

تتحرك عربة قطارٍ طولها ط إلى الإمام بسرعة سر، ويمشي رجل من مقدمة العربة إلى مؤخرتها في زمن ز. ما متوسط سرعته في إطار إسناد مثبتٍ بالقطار؟ وفي إطار مثبتٍ بالأرض؟ وما المسافة التي يقطعها فوق الأرض؟ في إطارِ إسنادٍ مثبتٍ بالقطار، يمكننا كتابةُ ما يلي:

سَ_1 = ط، سَ_2 = صفر، Δ سَ = − ط

نـ_1 = صفر، نـ_2 = ز، Δ نـ = ز

ويكون، في هذا الإطار، متوسطُ المركبةِ السينية لسرعةِ الرجل المتجهة كما يلي:

$$\overline{\text{سرَ}}_{\text{س}} = \frac{\Delta \text{ سَ}}{\Delta \text{ نـَ}} = -\frac{\text{ط}}{\text{ز}}$$

وفي إطار إسنادٍ مثبتٍ بالأرض، تعطينا معادلاتُ تحويل غاليلو ما يلي:

Δ س = Δ سَ + سر Δ نَـ = − ط + سر ز

Δ نـ = Δ نَـ = ز

لاحظ أنّ Δ س قد تكون موجبة، أو سالبة، أو صفراً، وفي هذا الإطار يكونُ متوسطُ المركبةِ السينية للسرعةِ المتجهة للرجل كما يلي:

$$\overline{\text{سر}}_{\text{س}} = \frac{\Delta\,\text{سَ}}{\Delta\,\text{ز}} = -\left(\frac{\text{ط}}{\text{ز}}\right) + \text{سر} = \overline{\text{سرَ}}_{\text{س}} + \text{سر}$$

إن متوسطي سرعته في الإطارين يساويان المقدارين $\overline{\text{سرَ}}_{\text{س}}$ و $\overline{\text{سر}}_{\text{س}}$

في الجزء 1 قدمنا وعرفنا أطر الإسناد القصورية. إن تحويل غاليلو يربط بين القياساتِ الكلاسيكية في أطر إسناد قصورية مختلفة. وتقتصر النظرية النسبية الخاصة special theory of relativity برمّتها على نحو مماثل على الأطر القصورية. ومن الهامّ، عند اعتبار هذا التقييد، أن نميز بين حركة الملاحظ وحركة الجسم الملاحظ. ذلك أن الملاحظين في النظرية النسبية يتحركون بسرعةٍ متجهةٍ ثابتة، أما الجسم الملاحظُ فيمكن أن يتحركَ بأية كيفيّة.

معضلة الكهرومغناطيسية The problem of electromagnetism:

إنّ حقيقة كوْنِ قوانين الميكانيك واحدة في جميع الاطر القصورية توضح ما أسماه بوانكاريه Poincare وآينشتاين Einstein بمبدأ النسبية principle of relativity(*). ويصدقُ المبدأ على الميكانيك الكلاسيكية عندما ترتبط قياساتُ المكان والزمان

(*) ذكر بوانكاريه ذلك كمبدأ للفيزياء الكلاسيكية التي بدت أنها في ورطة. أما آينشتاين فذكره كمبدأ للطبيعة يجب على الميكانيك الكلاسيكية أن تخضع له عند الضرورة

للملاحظين المختلفين بتحويل غاليلو. إذ عند ذلك، وبموجب المعادلات 8 – 10، يتساوى تسارع الجسم كما يقيسه الملاحظان:

ت = تَ .... (18)

ويفترض في القوة المؤثرة في الجسم أن تعتمد على موضع الجسم بالنسبة للأجسام الأخرى، (ومن الممكن على السرعات النسبية أيضاً). وهذا يعني أن القوة لا تعتمد على حركة الملاحظ:

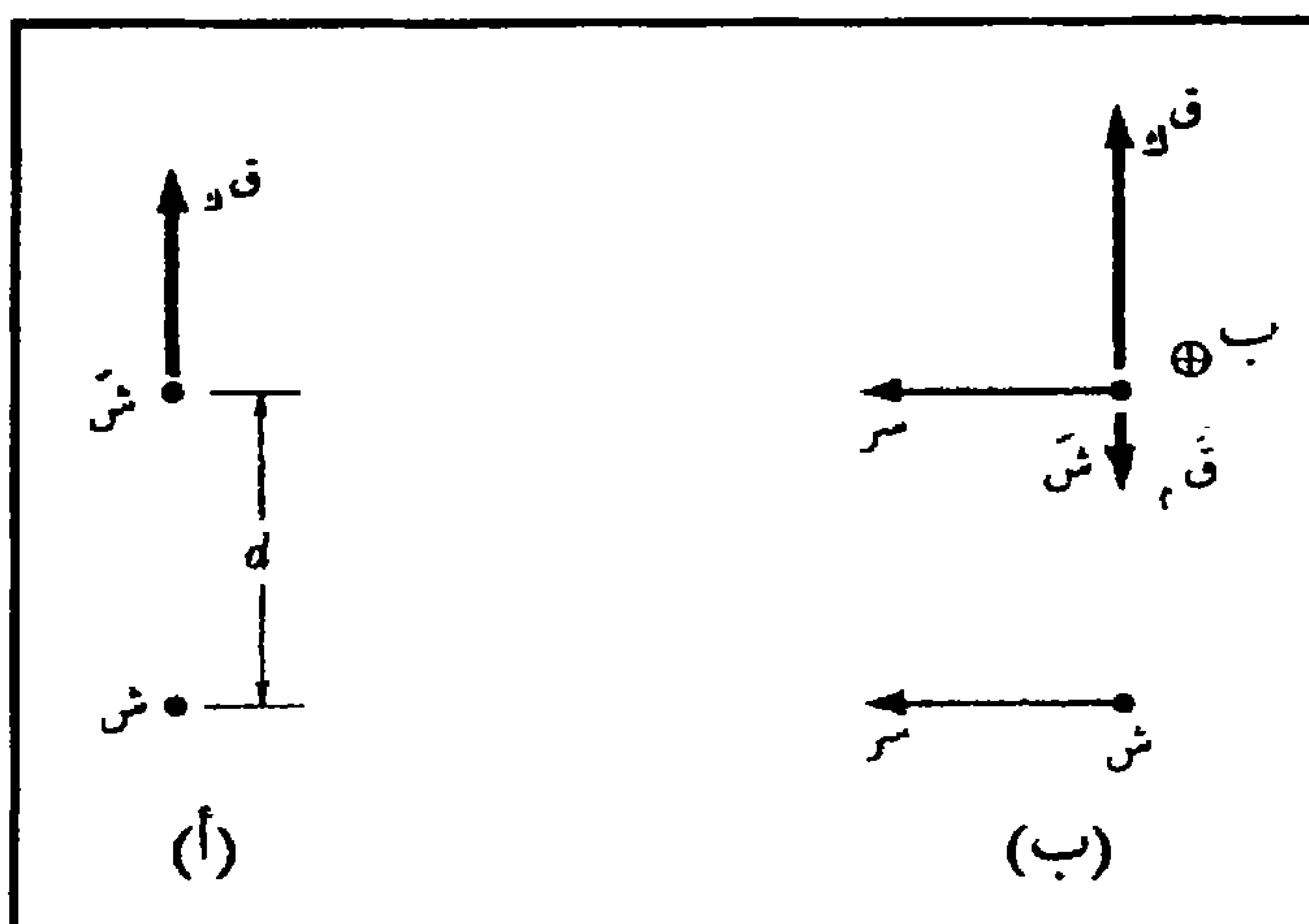
ق = قَ $\vec{F}$ [$= \vec{F}'$] .... (19)

وتكون الكتلة، إن كانت حقاً كمية مقدارية لا متغيرة – كما يفترض في الميكانيك الكلاسيكية – أيضاً واحدة لكلا الملاحظين:

قَ = كَ تَ .... [m = m] (20)

ولذلك، فإن قانون نيوتن الثاني لا يتغير، ويقال إنّه 'لا متغير invariant تحت التحويل'. وهذا يعني، إذا كانت ق = ك ت (F = ma)، أنّ:

قَ = كَ تَ .... $\vec{F}'$ [=] $m'\vec{a}'$ (21)



الشكل 3

أ) جسيمان مشحونان ساكنان في أحد أطر الإسناد. تتأثر الشحنة (شَ) بقوة كهربائية ق ك ($\overrightarrow{F_E}$). ب) وفي إطار إسناد آخر، يتحرك بالنسبة للأول، تتأثر الشحنة شَ بقوة كهربائية ق ك ($\overrightarrow{F_E}$) وقوة مغناطيسية قَ م ($\overrightarrow{F'_M}$)، ويكون المجالان الكهربائيان مـَ، مـَ ($\vec{E}$ و $\vec{E'}$) غير متساويين في مقدارهما في إطاري الإسناد.

كذلك يكون قانونا نيوتن الأول والثالث لا متغيرين أيضاً تحت تحويل غاليلو. ويمكن تطوير البنية الكاملة لميكانيك نيوتن بنفس شكلها في أي زوجين من الأطر القصورية التي ترتبط فيها قياسات المكان والزمان بالمعادلات 11 – 14.

ومن الطبيعي أن نستدرج لتجريب الأفكار نفسها على الكهرومغناطيسية، فاحصين معادلات هذه النظرية من حيث لا متغيريتها. أما الطريقة الفعلية لإجراء هذا الفحص فتخص المعالجاتِ الأكثر تقدما في الفيزياء. وكل ما في وسعنا عمله هنا هو مجرد الإفادة بأنّ مصير مثل هذه المحاولة هو الإخفاقُ أولاً. فعند تحويل قياسات أحدِ الملاحظين إلى قياسات مكانية وزمانية لملاحظ آخر باستخدام المعدلات 1 – 4 (أو 11 – 14)، فإن معادلات الكهرومغناطيسية لا تظل على شكل. وبالفعل، فالمعادلات الصحيحة في إطار إسنادٍ ما تتحولُ إلى معادلات غير صحيحة في إطار إسناد آخر. ويمكننا الحصول على ما يدلّ على أسباب هذه الصعوبة من اعتبار دور

السرعة المتجهة في قوانين الكهرومغناطيسية. لنفرض أن جسيمين من الجسيمات المشحونة ساكنان في المختبر، وأن المسافة بينهما ف [الشكل 3 (د)]. فوفق ملاحظٍ في المختبر، فإن كل جسيم يعاني قوة كهربائية نافرة ولا يعاني أية قوة مغناطيسية. أما بالنسبة لملاحظ يتحرك إلى اليمين بسرعة مقدارها سر، فيبدو الجسيمان في حالةِ حركة، ويجدُ لذلك قوة مغناطيسية جاذبة تؤثر في الجسيمين، بالإضافة إلى قوة التنافر الكهربائية. وحتى تتساوى القوة الكلية المؤثرة في شَ لكلا الملاحظين، فلابدّ أن تكون القوة الكهربائية ق ك أكبر من القوة الكهربائية قَ ك، نظراً لأن قَ = قَك + قَم . وإذا افترضنا علاوةً على ذلك أن الشحنة كميةٌ مقداريةٌ – وهي لذلك لا متغيرة – فإن المجالين الكهربائيين اللذين يراهما الملاحظان يجب أن يكونا مختلفيْن أيضاً:

مـ > مـ $[E' > E]$

وتكون النتيجة، باتباع مزيد من التحليل المشابه، أن التكاملين السطحيين للمجال الكهربائي المحيط بالشحنة يكونان أيضاً غير متساويين بالنسبة للملاحظين إذا ما ارتبطت قياساتهما المكانية والزمانية بتحويلِ غاليلو:

∮ مـَ . د حـَ > ∮ مـ . د حـ $[\oint \vec{E'} \cdot d\vec{S'} > \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}]$

وهذا يعني أنه إذا كان قانون غاوس:

∮ مـ . د حـ = شـ / ϵ $[\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}]$

صحيحاً في أحدِ إطاري الإسناد، فإنه لا يكونُ صحيحاً في الآخر.

إن دورَ سرعةِ الضوء في النظرية الكهرومغناطيسية يُعطينا دليلاً إضافياً على عدم التوافق الظاهري بين النظرية ومبدأ النسبية. فالأمواجُ الكهرومغناطيسية تنتشر بسرعةٍ مقدارها C تتحدد بالمعادلة التالية:

$$C = \frac{1}{\sqrt{.\ni.\mu}} \qquad [C = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}}\ .] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

وعلى كل حال، فوفق تحويل غاليلو (وعلى وجد التحديد: المعادلة 5)، تعتمد سرعة الضوء – أو أيّ شيءٍ آخر – على حالة حركة الملاحظ. ولذلك فإذا كان μ. و ∍. ثابتين لا متغيرين، فإن السرعة C المحسوبة بالمعادلة 22 يجب أن تساوي سرعة الضوء في إطار إسناد قصوري واحد لا غير. وفي المقابل، فإذا كان للمعادلة 22 أن تحدد السرعة المقيسة في جميع الأطر القصورية، فإن الثابت ∍. يجب أن يتغير من إطار إلى آخر (نظراً لأن μ. اختيرت اعتباطاً كثابت). ومثل هذا التغير يجعل قانون كولوم للقوة الكهربائية يعتمد على حالة حركة الملاحظ.

وخلاصة القول، فإن قوانين الميكانيك لا متغيرةً تحت تحويل غاليلو، أما قوانين الكهرومغناطيسية فهي على خلاف ذلك متغيرة. ويمكن تصور هذا الفارق بينهما بعدة طرق بديلة. (1) إن مبدأ النسبية يتحقق مصادفة في الميكانيك، إلا أنه ليس مبدأ عاماً للطبيعة، وهو لذلك غير هام. (2) إن النظرية الكهرومغناطيسية غير صحيحة، ويجب تغييرها للتوافق ومبدأ النسبية. (3) إن مبدأ النسبية صحيح، إلا أن تحويل غاليلو (وتبعاً لذلك، قوانين الميكانيك) يجب أن يطرح، ويجب العثور على تحويل آخر جديد يسمح لقوانين الكهرومغناطيسية بأن تكون لا متغيرة. إن ماكسويل وآخرين من بناة النظرية الكهرومغناطيسية في الجزء الأخير من القرن التاسع عشر تبنّوا وجهة النظر الأولى (مع أنه من المحتمل أنهم لم يفكروا في هذا الأمرِ وفق التصور المشار إليه آنفاً). فبالنسبة لهم كان وجود إطار إسناد مفضلٍ في الكون بمثابة عقيدة أساسية راسخة في نفوسهم، ولذلك تصوروا وجود وسط فيزيائي – الأثير ether – يملأ المكان في الكون كله. وفي كون يملؤه الأثير فليس ثمة حاجة إلى الاعتقاد بمبدأ النسبيةّ؛ بل بدلاً من ذلك، فأن المرء يتوقع أن تتجلى قوانينُ الطبيعة في أبسط صورها في إطار الإسناد الذي يكونُ فيه الأثيرُ ساكناً، وربما تتخذ شكلاً آخر في أطر أخرى. أما آينشتاين، الذي كان

مدفوعاً بعقيدة نابعة من ذاته – أي بالإيمان بالصحة الكونية universal validity لمبدأ النسبية – فقد تبنى وجهة النظر الثالثة الجريئة. وعلى هذا الأساس بنيت ميكانيك جديدة. ورؤية جديدة للكون، وحتى تبصر جديد أعمق للكهرومغناطيسية. ومع أن معادلات الكهرومغناطيسية نجت من ثورة النسبية من دون أن تتغير، إلا أن تفسير هذه المعادلات اعتراه بعض التبدل.

إن تحويلَ آينشتاين الذي يربطُ القياسات المكانية والزمانية لملاحظين مختلفين (جميعهم في أطر قصورية) يدعى بتحويل لورنتز Lorentz transformation. ويكوّن هذا التحويل الجديد وبعض نتائجه الفذة لبّ الفصل التالي. وسنناقش فيما تبقى من هذا الفصل البحث المخفق عن إطار إسناد مفضل والذي جرى في سنوات ما قبل النسبية، وكذلك فرضيات آينشتاين التي أعطت مضموناً مثيراً "للعدم nothingness" الذي كان نتاج هذه الجهود المخفقة.

تجربة ميكلسون – مورلي The Michelson – Morley experiment:

في معرض مدحه لفكرة الأثير، قال ماكسويل، عام 1873:

"إن المناطق الشاسعة ما بين الكواكب والنجوم لن تعتبر بعد الآن أماكن مهدورة في الكون، لم يجدها الخالق ملائمة لملئها برموز نظام مملكته ذي الأوجه المتعددة. بل سنجدها تزخر بهذا الوسط الرائع...، هذا الوسط الذي يمتد بلا انقطاع من نجم إلى نجم. وعندما يهتزُّ جزيء هيدروجين في نجْم الشعرى اليمانية dog – star، يستقبل الوسط نبضات هذه الاهتزازات، وبعد أن يحملها في صدره الهائل ثلاث سنوات، يسلّمها في الوقت المناسب، وبتتابعها المنظّم. وقصتها الكاملة إلى مطياف السيد هجنز Huggins، على تلة طلس Tulse Hill"(*).

(*) المقالة الكاملة التي أخذ منها هذا المختصر موجودة في:
Arthur Beiser, ed. The World of Physics (New york: McGraw – Hill Book Company, 1960)

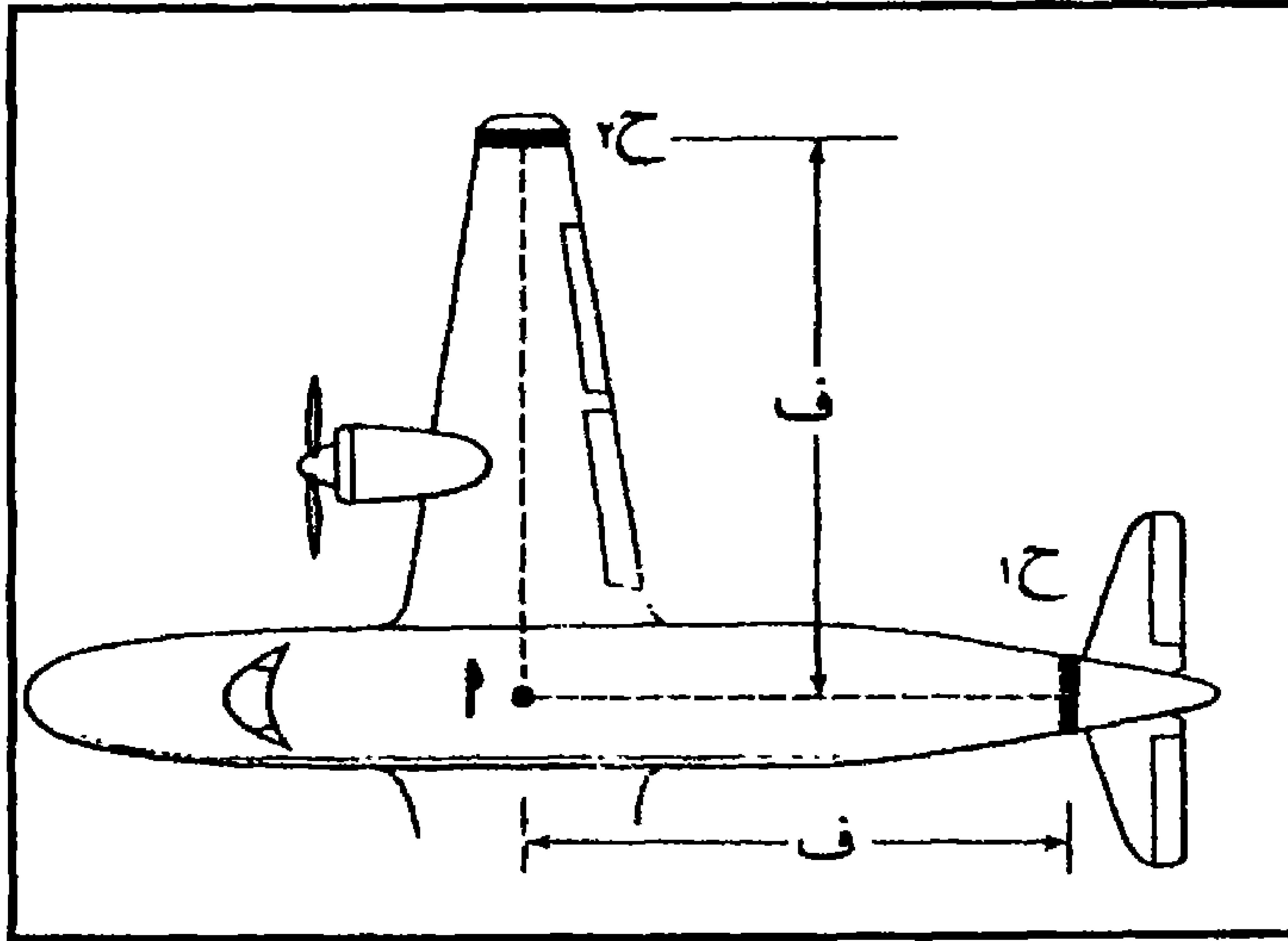
لقد عاش الأثير، لمدة قرنين من الزمان، في عقول العلماء، غير أنه حتى ذلك التاريخ لم يشرْ أي دليلٍ تجريبي مباشر، مهما كان ضئيلاً، إلى وجوده في أي مكان آخر. لقد حان الوقت للعثونر على الأثير. ومن بين الجهود المتعددة التي بُذلت للعثور عليه في العقود اللاحقة، سنناقش واحداً منها فقط وهو تجربة ميكلسون ومورلي.

وأما إمكان إجراء اختبارٍ تجريبي حاسم للكشف عن وجود الأثير، فقد تحقق منه لأول مرة ألبرت ميكلسون، الذي كان في عام 1879 (كملازم في البحرية الأمريكية عمره 26 سنة) قد أصبح معروفاً بعد قياسه سرعة الضوء بدقة كبيرة.

وقد أتت محاولته الأولى للكشف عن حركة الأرض في الأثير في عام 1881 في بوتسدام Potsdam، في ألمانيا. ووجد لدهشته أنه لم يستطع الكشف عن أية حركة نسبية للأرض والأثير. بيد أن دقة قياسه لم تكن كبيرة، ولذا لم تثر أية ضجة هامة في دنيا العلم. لكن عندما أعاد ميكلسون وادوارد مورلي Edward Morley التجربة نفسها بعد ست سنوات في كليفلاند Cleveland، بولاية أوهايون، باستخدم أجهزة محسنة كثيراً، لم يعدْ من الممكن التغاضي عن النتيجة السلبية التي حصلا عليها، ذلك أنه لم يكشف عن أية حركة ظاهرية للأرض في الأثير. وقد أيدت إعاداتٌ عديدة للتجربة نفسها في العقود اللاحقة نتيجة عام 1887، وهي أنه لا توجد هناك أية حركة نسبية محسوسة للأرض والأثير(*).

(*) اجريت صورة مختلفة لتجربة الريح الأثيرية ether – wind في جامعة كولومبيا في 1958 من قبل سدرهلم J.P. Cedarholm، بلاند G.F.Bland، هافنز B.L.Havens وتاونز C.H.Townes ونشرت في مجلة Physical Review Letters 1.342 (1958)، ووجدت النتيجة السلبية المتوقعة، لكن بدقة أكبر من دقة النتائج السابقة. وبما أن أي انحراف عن النتيجة الصفرية، مهما كان صغيراً، سوف يكون ذا أهمية بالغة، فمّما لاشكّ فيه أن إجراء التجارب سوف يستمرّ كلما طورت تقنيات أكثر دقة.

ولفهم تجربة ميكلسون – مورلي، نترك مؤقتا الامواج الضوئية إلى الأمواج الصوتية. فلو أمكنَ لركابِ طائرةٍ في أثناء طيرانها قياس سرعة أمواج الصوت في الهواء، لوجدوا قيماً مختلفة تماماً لسرعة الصوت بالنسبة للطائرة بحسب اتجاه حركة الصوت. فمثلاً، نجد ونحن في طائرة تتحرك بنصف سرعة الصوت، أن أي موجة صوتية تتحرك في الاتجاه المضاد تبدو وكأن سرعتها بالنسبة للطائرة تزيد 50 بالمائة على سرعة الصوت العادية. بينما نجدُ، من جهة ثانية أن أي موجة صوتية تتحرك باتجاه الطائرة، تكون سرعتها بالنسبة للطائرة نصف سرعة الصوت العاديّة. وبناء على وجهة نظر ميكلسون، فنحن جميعاً ركباً على الأرض التي تنتقل عبر الأثير. فإذا ما واجهْنا أمواجاً ضوئية فسوف نجدُها وجوباً تتحرك بسرعتين مختلفتين بالنسبة للأرض، بحسب كون الضوء يتحرك صوبنا في رحلتنا عبر الأثير، أو يتحرك لاحقاً بنا في اتجاه حركتنا.



الشكل 4

مقياس غير عادي لقياس سرعة الهواء. تبدأ أمواج الصوت من النقطة أ، وتعود للنقطة أ بعد انعكاسها عن اللوحين المتاسويي البعد ح1 و ح2. إن الفرق في الزمن بين صدى الصوتين العائدين يزودنا بقياس لسرعة الهواء.

والسببُ واحد في حالة كل من الضوء والصوت؛ إذ يفترض أن كلاً منهما يتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة للوسط الذي ينتشر فيه. تصور الآن مقياساً غير عادي لسرعة الهواء مثبتاً بالطائرة، يتكون من مولد للصوت ومستقبل له (كالميكرفون) مثبتٍ على ظهر الطائرة، ومن صفيحتين صغيرتين لعكس الصوت، أحداهما مثبتة بالذيل والاخرى بطرف الجناح، وعلى بعدين متساويين من مجموعة المولد والمستقبل (الشكل 4) ولنفترض أن صوتاً ما يحدث وأن صداه، بعد مضي بعض الوقت، يعود من الذيل وطرف الجناح. فإذا كانت الطائرة متحركة، فإن صدى طرف الجناح يصل إلى المستقبل قبل صدى الذيل بقليل، ويمكن إظهارُ فارق الزمن هذا على الأجهزة داخل القمْرة cockpit، كي يطلع القبطان على السرعة التي تتحرك بها الطائرة. ولنفرض مثلاً أن سرعة الطائرة 170م/ ث، أي نصف سرعة الصوت (240م/ ث)ن وأن كلا الصفيحتين العاكستين تقع على بعد 6م من مصدر الصوت. عندئذ تكون سرعةُ الموجة المتجهة صوب الذيل بالنسبة للطائرة 510 م/ ث، ولذلك تستغرق رحلتها إلى الذيل 0.01176 ث (11.76 مـ ث ms). أما في رحلة العودة، فتكون سرعتها بالنسبة للطائرة 170 م/ ث فقط وتحتاجُ إلى ثلاثة أمثال الزمن كي تعود، أي إلى 35.29مـ ث، وفي الجملة يمر 47.05 مـ ث قبل عودة صدى الذيل. ومن المفيد أن نعبّر عن ذلك جبرياً. أن زمن انتقال الصوت من المصدر إلى عاكس الذيل ح1 (الشكل 4) على بعد ف (L)، هو:

$$\text{نـ}_{\text{صفر}} = \frac{\text{ف}}{\text{سر}_{\text{ط}} + \text{سر}_{\text{ص}}} \qquad \left[t_{out}\ \frac{L}{V_s + V_a}\right]$$

حيث سر ط (Va) هي سرعة الطائرة وسر ص (Vs) هي سرعة الصوت، والمجموع سر ط + سر ص (Vs + Va) هو سرعة الصوت المتجة نحو المؤخرة بالنسبة للطائرة. أما زمن عودة الصدى فهو:

$$ن_{عودة} = \frac{ف}{سر_{ص} - سر_{ط}} \qquad \left[t_{return} = \frac{L}{v_s - v_a}\right]$$

ولذا فإن الزمن الكلي لرحلة صدى الذيل ذهاباً وإياباً هو مجموع هاتين القيمتين:

$$ن_{(صدى\ الذيل)} = ن_{صفر} + ن_{عودة} = \frac{2ف}{سر_{ص}} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{سر_{ط}}{سر_{ص}}\right)^2}\right] \ldots\ldots$$

$$\left[t_{out} + t_{return} = t_{(صدى\ الذيل)} = \frac{2L}{v_s} \cdot \frac{1}{1-(v_a/v_s)^2}\right]$$

وبتحليلٍ مماثلٍ نستطيع أن نحسب الزمن الكلي لصدى طرف الجناح، وهو يساوي:

$$ن_{(صدى\ طرف\ الجناح)} = \frac{2\ ف}{سر\ ص} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{سر\ ط}{سر\ ص}\right)^2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (24)$$

$$\left[t_{(صدى\ طرف\ الجناح)} = \frac{2L}{v_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v_a/v_s)^2}}\right]$$

إن ما يهمنا هنا هو أن هذا الزمن الأخير أقصر ويساوي 40.75 مـ ث في مثالنا. إن الحركة تؤخر صدى الصوتين، غير أن تأخير صدى الذيل يزيد على تأخير صدى طرف الجناح.

ومن السهل تفسير هذا الفرق بدلالة سرعة الطائرة.

وتعتبر تجربة ميكلسون – مورلي مقياساً لسرعة الأثير مصمماً في مماثلة تامة لقياسنا اللاتقليدي لسرعة الهواء. إذ يرسل الضوء في وقت واحد في اتجاهين متعامدين، ثم ينعكس عائداً. ولأن مصدر الضوء وأجهزة القياس الأخرى مثبتة

بالأرض، فإنها تنتقل عبر الأثير بوساطة الأرض. أما الفرق في الزمن بين الإشارتين الضوئيتين المنعكستين فهو أصغر من أن يقاس مباشرة، إلا أنه يمكن استنتاجه من تداخل الموجتين. ويبين الشكل 5 تصميم التجربة. فموجة الضوء المنبعثة من المصدر م (S) الشكل 5 (أ) تنقسم بوساطة لوحٍ زجاجي مفضض قليلاً إلى موجتين، أحداهما تنتقل إلى أعلى نحو المرآة مـ2 (M2) والأخرى تستمر في سيرها نحو المرآة مـ1 (M1). ويؤمنُ انقسامُ الشعاع هذا تحالف الموجتين coherent وتساويهما في الطور phase في البداية. ويوفر لوح زجاجي إضافي ح (G) مساراً متساوياً في الزجاج لكلا الشعاعين. ويمر بعض الضوء العائد من مـ2 (M2) في اللوح المفضض، بينما ينعكس بعضه العائد من مـ1 (M1) عن سطح اللوح المفضض إلى عين الملاحظ (أو من الأفضل، إلى أداة حساسةٍ للضوء أكثر دقة من العين البشرية). فإذا كانت المرآتان مـ1 و مـ2 (M1 و M2) على نفس البعد تماماً من النقطة ر (R) [وهذا ليس ضرورياً، إلا أنه يسهّلُ الأمور قليلاً]، وإذا كان الجهاز ساكناً بالنسبة للأثير، فإن الموجتين اللتين تصلان إلى الملاحظ تكونان في نفس الطور تماماً، وتدعم الواحدة الأخرى لتحدثا بقعة ساطعة من الضوء. أما إذا كان الجهاز يتحرك عبر الأثير، إلى اليسار مثلاً في الشكل، فإن الضوء من مـ1 سيتأخر بعض الشيء في رحلته ذهاباً وإياباً عن الضوء من مـ2، ولا تعود الموجتان متساويتين تماماً في الطور، وسيحدث تداخل جزئي بينهما، وسيكون الضوء الذي يراه الملاحِظُ أقل سطوعاً.

وبالطبع، لا نستطيع إيقاف الأرض وتحريكها بمحض مشيئتنا من أجل أن نعثر على تغير في شدة الضوء. بيد أننا نستطيع أن نفعل شيئاً بسيطاً له نفس الفعالية، وهو تغيير اتجاه الجهاز. وقد أدار ميكلسون الجهاز برمته 90°، بحيث أصبح المسار إلى مـ1، إن كان في البداية "معاكساً للريح upwind" أو في اتجاهه downwind"، "متعامداً عليه crosswind". وكان يجب أن نلاحظ تغيراً في الشدّة في أثناء الدوران. وقد أعاد

ميكلسون ومورلي التجربة في أوقاتٍ مختلفةٍ من السنة ليصيبا حركة الأرضِ في اتجاهاتٍ مختلفةٍ في الفضاء في أثناء دورانها حول الشمس.

إن مقدار التأثير الذي توقّع ميكلسون ملاحظته كان صغيراً للغاية، لن الأرض حتى عند سرعتها المدارية التي تبلغ 3×10^{4} م/ ث (6600ميل/ س)، تحبو بالمقارنة مع سرعة الضوء. ولحساب الأثر المتوقّع، نستطيع استخدام المعادلتين 23 و 24، حيث نضع محل سر ص (Vs) سرعة الضوء C، ومحل سر ط (Va) سرعة الأرض سر (V). ومما يساعد على ذلك أيضاً أن نكتب هاتين المعادلتين بشكل تقريبي دقيق عندما تكون النسبة سر/ C [V/C] أصغر من 1 بكثير. ومن المعادلة 23 نجد أن:

$$\text{نـ (في اتجاه الريح أو عكسه)} = \frac{2\,\text{ف}}{C}\,\frac{1}{1-\left(\frac{\text{سر}}{C}\right)^{2}} \cong \text{نـ}\left[1+\left(\frac{\text{سر}}{C}\right)^{2}\right] \;\ldots\ldots$$

(25)

ومن المعادلة 24 نجد أن:

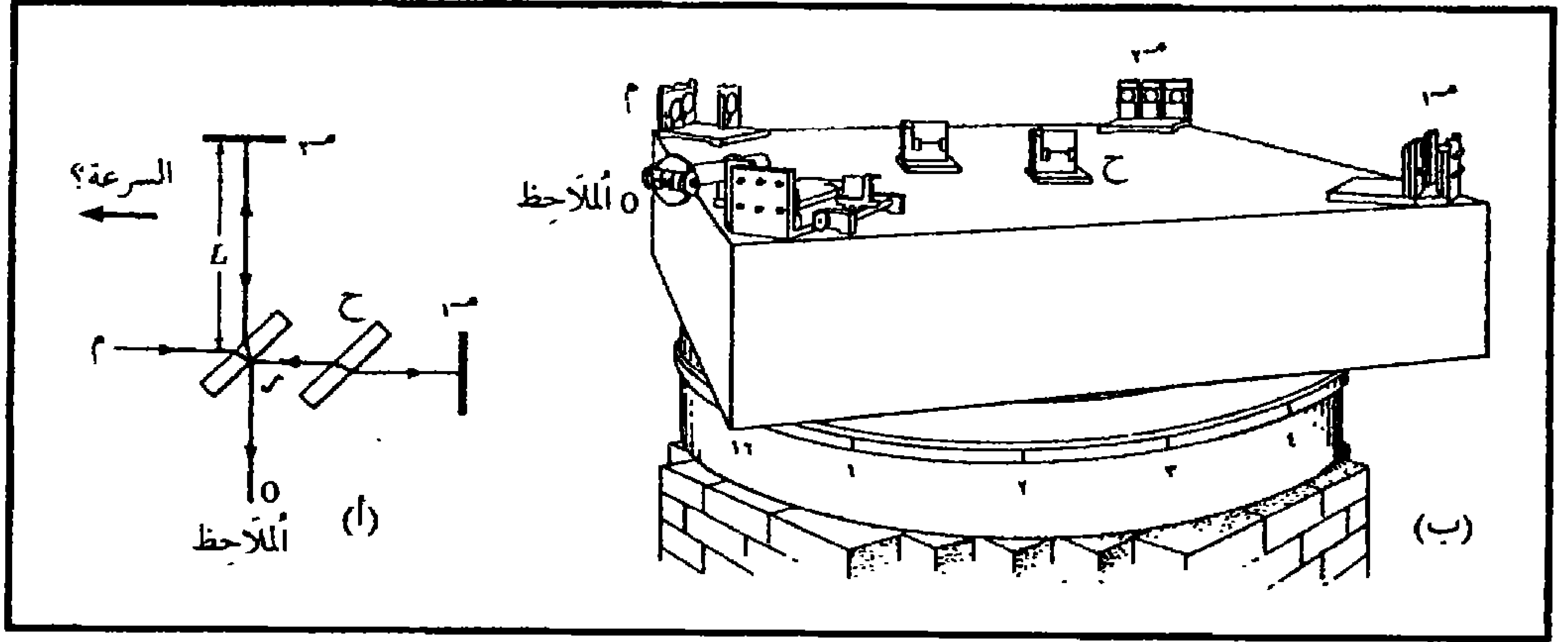
$$\text{نـ (في اتجاه متعامد مع الريح)} = \frac{2\,\text{ف}}{C}\,\frac{1}{\sqrt{1-(\text{سر}/C)^{2}}} \cong \text{نـ}\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{\text{سر}}{C}\right)^{2}\right] \ldots(26)$$

حيث استخدمنا نـ (to) للدلالة على $\frac{2\,\text{ف}}{C}$ [$\frac{2L}{C}$]، وهو زمن الرحلة ذهاباً وإياباً في حالة انعدام "الريح". أما الفرق بين زمني الرحلتين ذهاباً وإياباً فهو.

$$\Delta\,\text{نـ} = \frac{1}{2}\left(\frac{\text{سر}}{C}\right)^{2}\text{نـ} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \;(27)$$

$$\left[\Delta t = \frac{1}{2}\left(\frac{V}{C}\right)^{2} to\right]$$

وإذا فرضنا، كما فعل ميكلسون، أن سرعة الأرض عبر الأثير تساوي تقريباً سرعتها المدارية، فإن $\frac{\text{سر}}{C} \cong \left(\frac{V}{C}\right)$ 10^{-4}. إن المسافة من اللوح المفضض جزئياً إلى المرآتين العاكستين [الشكل 5 ب] كانت 11م على أنسب تقدير. وبتعويض هذه الأرقام في المعادلات السابقة، نحصل على نـ (to) = 7.3×10^{-8} ث وعلى Δ نـ (Δt) = 3.7×10^{-16} ث.



الشكل 5

أ) رسم تخطيطي لمقياس تداخل interferometer ميكلسون. المصدر عند م، والملاحظ عند O.

ب) جهاز ميكلسون ومورلي: المرآتان ولوحا الزجاج مثبتة على قاعدة حجرية طول ضلعها 1.5م وتطفو في وعاء به زئبق. وتعمل الانعكاسات المتعددة على إطالة المسافة ف (L) إلى حوالي 11م. الرسم مقتبس من:

W.F. Magie, ed. A Source Book in Physics (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1935), p. 373.

إن المسافة المتوقعة لتأخر أحد الشعاعين المنعكسين عن الآخر تساوي إذن ΔC نـ (CΔt) أو 1.1×10^{-7} م (1100 أ). وتقل هذه المسافة 5 مرات عن الطول الموجي

للضوء المرئي. ولذلك، فإن الانزياح المتنبأ بـه، عنـد إدارة الجهـاز، لأي مـن الموجتين بالنسبة للأخرى يقل نوعاً ما عن الثلاثة آلاف انجستروم (3000أ) التي تلـزم لتحويـل التــداخل البنــاء constructive interference الســاطع إلى تــداخل هــدّام معــتم destructive interference. وعلى كل حال، فقـد كـان مـن السـهل ملاحظـة الـتغير الناتج في الشدة. وقد كان ميكلسون ومورلي على ثقة بأنهما يستطيعان الكشـف عـن تغير في الطور يصغر القيمة المتنبأ بها بعشرين مرة.

وأياً كان الوقت خلال النهار أو خلال السنة، وأياً كان مصدر الضوء المستخدم، فإن دوران الجهـاز لم يحـدث قـط أي تغـير ملمـوس في شـدة الضـوء، وكـان مقيـاس ميكلسون – مورلي لسرعة الأثير يعطي دوماً قراءة صفرية، دلت علـى انعـدام حركـة الأرض عبر الأثير.

جهود للإبقاء على الأثير Efforts to keep the ether:

لقد ثبت عدم سهولة التخلي عن الأثير. فعلى مدى عقدين بذلت جهود عديـدة للإبقاء على الأثير بالرغم من نتيجة ميكلسـون – مـورلي والنتـائج السـلبية الأخـرى للتجارب اللاحقة لتعقب الأثير. ولم يفكر ميكلسون نفسـه في التخلـي عـن الأثـير، إذ اعتقد أن الطبيعة قد خدعته بطريقة لا يستطيع تفسيرها، جاعلة تصميمه للتجربة غـير مناسب للكشف عن الأثير. إن أبسـط خـداع مـن هـذا النـوع يمكـن تصـوره هـو أن الأرض تجرُّ بعض الأثير معها.

وبموجب فرضية إنجرار الأثير ether –drag هـذه، يمكـن تفسـير النتيجـة السـلبية لتجربة ميكلسون – مورلي، باعتبار أن الأثير، بالقرب من سطح الأرض، يكونُ ساكناً بالنسبة للأرض. وهذا النوع من الإنجرار معروفٌ تماماً في حالـة الطـائرات، الـتي تجـرُّ معها طبقة رقيقة جداً من الهواء الساكن تعـرف بالطبقـة الحديـة boundary layer. إنّ أي مجس probe لسرعة الهواء يخترق الطبعة الحدّية فقط سوف لا يسـجّل أيـة حركـة،

ولابد له من أن يخترق الطبقة الحديثة متعدياً إياها إلى مجرى الهواء بعدها ليتمكن من كشف حركة الطائرة عبر الهواء. ويمكن للأقمار الصناعية اليوم أن تضع على نحوٍ مماثل مجسّ ميكلسون – مورلي لسرعة الأثير في موقع في الفضاء يتعدّى الطبقة الحدية للأثير. بيد أنه في الوقت نفسه، لابدّ من التخلي عن فرضية إنجرار الأثير: أولاً، لأنها يجب أن تحدث بعض الانحناء لضوء النجوم الواصل إلى الأرض، وهو لم يشاهد أبداً، وثانياً، لأن نظرية النسبية الناجحة قد دفعتنا إلى التخلي عن الأثير كلية، بانجرارٍ أو من دونه. ومع ذلك فقد تعود العلماء توقع اللامتوقع، وبكلّ تأكيد فإن تجربة ميكلسون – مورلي ستعاد يوماً ما بعيداً عن سطح الأرض(*)..

والاقتراحُ الآخرُ الذي لقي نفس مصير فرضية انجرار الأثير، وللأسباب نفسها، كان الاقتراح بأن الضوء ينتقل بسرعة ثابتة، لا بالنسبة للأثير، بل بالنسبة لمصدر الضوء. وقبل انقضاء عدة سنوات عليه، دفن هذا الاقتراح نتيجة للأدلة الفلكية. فبعض النجوم تظهر في أزواجٍ يدور فيها أحد فردي الزوج حول الآخر. وعندما يتحرك أحد فردي الزوج نحو الأرض، يتحرك الآخر مبتعداً عنها. ومع ذلك، فقد أظهرت الملاحظاتُ الدقيقة أن سرعة ضوء النجم المقترب من الأرض لا تختلف عن سرعة ضوء النجم المبتعد عنها.

وثمة اقتراح آخر أكثر تطرفاً، تقدم به جورج فيتز خرالد George F. FitzGerald في عام 1892، أخفق كتفسير لنتيجة تجربة ميكلسون – مورلي؛ إلا أنه كغيره من العديد من المقترحات العلمية الخاطئة، تسبب في بعض النتائج قبل موته. لنفرض، قال فيتزجرالد، أن الأجهزة المخبرية تنكمش في اتجاه حركتها عبر الأثير بقدر يكفي للتعويض تماماً عن النقصان في سرعة الضوء المتوسطة التي هي أبطأ في اتجاه

(*) في المدة ما بين 1926 – 1928، أعاد أغسطس بيكارد Auguste Picard تجربة ميكلسون – مورلي في بالون على ارتفاع 8000 قدم تقريباً عن سطح الأرض، وحصل على نفس النتيجة السلبية المتوقعة.

الريح وفي اتجاه معاكس لها منها في الاتجاه المتعامد. وبما أنّ الانكماش اللازم، على الأرض هو في حدود جزء واحد فقط من مئة مليون، فإن هذا الأثر الدقيق لا يتعارض مع أي من القياسات السابقة. هذا وصاغ لورنتز في العام نفسه فرضية الانكماش لفيتزجرالد في شكل رياضي، ووجدت علاقاته الرياضية طريقها أخيراً إلى النسبية ولكن بتفسير مختلف بشكل بارز. وفي كل مرة تستخدم فيها الرياضيات لوصف الطبيعة، فإن الهيكل الرياضي المستخدم لا معنى له من دون شرح الرموز المستخدمة وتعريفها. وقد شهدت علاقاتُ لورنتز تطوراً بارزاً في معناها في غضون المدة ما بين زمن فرضية فيتزجرالد عام 1892 وزمن نظرية آينشتاين النسبية عام 1905.

النظرية النسبية الخاصة: فرضيتا آينشتاين:

The special theory of relativity: Einstein's two postulates

وقد بدا واضحاً بحلول عام 1900 أن الكشف عن الأثير ليس بالأمر الهيّن. وأخذ العلماء يُحسّون أن حالهم كحال ثعلب عيْسوب Aesop's fox الذي عجز عن الوصول إلى العنب. وأدت هذه الحال بهنري بوانكاريه Henri Poincareن الذي ربما كان أول من رأى بوضوح الدلالة الكامنة للإخفاق في الكشف عن الأثير، إلى القول: "وأثيرنا هذا، هل يوجد حقاً؟ إني لا اعتقد أن المزيد من الملاحظات الدقيقة يمكن أن تكشف أبداً عن شيء أكثر من إزاحات نسبية". ورفض آينشتاين باستقلال عن الآخرين فكرة الأثير. ففي بحثه العلميّ الأول في النسبية المنشور عام 1905 (الذي طوّر فيه ما نسميه الآن بالنظرية النسبيّة الخاصة)، كتب يقول: "إن إدخال الأثير لفهم انتقال الضوء "luminiferous ether" سيبدو بلا ضرورة نظراً لأن وجهة النظر المطوّرة هنا لا تتطلبُ "وسطاً ساكناً مطلقاً" يتمتع بصفات خاصة".

ومن الهام أن نفهم لماذا يعتبر رفض فكرة الأثير أمراً بالغ الأهمية. فمن دون الأثير، ينتفي الأساس الفيزيائي لإطار إسناد مفضل. ويعني ذلك أن جميع الأطر – وعلى الأقل الأطر القصورية – يجب أن تكون متكافئة، وأن مبدأ النسبية Principle

of Relativity مبدأ عام صادق. وعبّر آينشتاين عن هذا المبدأ في بحثه المشار إليه بالشكل التالي: "أن الأمثلة من هذا القبيل، مع المحاولات المخفقة للكشف عن أية حركة للأرض بالنسبة "للوسط الناقل للضوء" يؤدي إلى الافتراض بأن الظواهر الكهرودينامية والميكانيكية على حد سواء لا تمتلك أية صفات تناظر فكرة السكون المطلق، بل، ... إلى أن القوانين الكهروديناميكية وقوانين الضوء نفسها هي صحيحة في كل أطرِ الإسنادِ التي تصحّ فيها معادلات الميكانيك". ومبدأ النسبية هذا هو أول فرضيتين بنيت عليهما النظرية النسبية الخاصة. أما الفرضيّة الثانية، والتي على حد قول آينشتاين "لا تتوافق في الظاهر فقط مع الفرضية الأولى"، فهي أن سرعة الضوء ثابت مطلق، مستقل عن حركة مصدر الضوء ومستقل عن حركة الملاحظ. وهاتان الفرضيتان "لا تتوافقان" في حالة واحدة فقط وذلك عندما يفكر المرء بلغة تحويل غاليلو الذي يتطلب أن تكون جميع السرعات، بما فيها سرعة الضوء، منسوبة إلى حركة الملاحظ. أما تحويل لورنتز الجديد فهو الذي يوفق بين الفرضيتين.

وإلى جانب نتائجها العامة الفذة، فإنّ للنظرية النسبية الخاصة رونقاً فريداً نظراً لما للفرضيتين اللتين ترتكز عليهما النظريّة برمّتها من إناقةٍ بسيطة:

1. قوانين الطبيعة واحدة في كل أطر الإسناد القصورية.
2. سرعة الضوء واحدة في كل أطر الإسناد القصورية.

إن الأهمية الثورية للفرضية الثانية هي الموضوع الرئيس للفصل العشرين. وفي العبارة البسيطة التالية: C = ثابت (C = constant) تحجز قنبلة عظيمة الأثر. وليست الفرضية الأولى، أي مبدأ النسبية، والتي سنعالجها بأقل قوة من الفرضية الثانية.

دار جرير للنشر والتوزيع

خلاصة الأفكار والتعاريف:

Summary of ideas and definitions:

تعالج النظرية النسبية مجالات من الطبيعة بعيدة عن الإدراك الإنساني. وبالرغم من ذلك فإن لها تضمناتها العملية.

لنظرية النسبية فكرتان أساسيتان هما: النسبية relativity التي تشير إلى الاختلاف في القياس بين الملاحظين، واللامتغيرية invariance التي تشير إلى توافق الملاحظين المختلفين في قياساتهم.

الحدث event نقطة في المكان والزمان، وهو عادة – وليس بالضرورة – نقطة يحدث فيها شيء ذو أهمية فيزيائية.

التحويلُ: transformation هو مجموعة من المعادلات تربط قياسات ملاحظ بقياسات ملاحظ آخر.

ينص مبدأ النسبية على أن قوانين الطبيعة واحدة في كل أطر الإسناد القصورية. ويعتمد تطبيقه على قانون التحويل الذي يربط الأطر المختلفة بعضها ببعض.

التفكير الكلاسيكي حول المكان والزمان Classical Thinking about Space and Time	التفكير الحديث حول المكان والزمان Modern Thinking about Space and Time
الزمان مفهوم لا متغير.	الزمان مفهوم نسبي.
قياسات المكان والزمان لملاحظين في حالة حركة نسبية ترتبط مع بعضها بعضاً بتحويل غاليلو (المعادلات 1 – 4 أو 11 – 14)	نحتاج إلى تحويل جديد، يدعى تحويل لورنتز، لربط قياسات المكان والزمان لملاحظين في حالة حركة نسبيّة بعضها ببعض.
يربط تحويل غاليلو بين أطر الإسناد	النظرية النسبية الخاصة (مع تحويل لورنتز

القصورية. تتوافق الميكانيك مع مبدأ النسبية، أما الكهرومغناطيسية فلا تتوافق معه. يجب أن تكشف تجربة ميكلسون – مورلي (وغيرها من التجارب ذات العلاقة) عن حركة الأرض عبر الأثير. يجب أن تعتمد سرعة الضوء المقيسة على حركة الملاحظ (المعادلة 5).	الخاص بها) تقتصر أيضاً على ملاحظين في أطرٍ قصورية. جميع قوانين الطبيعة تتوافق مع مبدأ النسبية (فرضية آينشتاين الأولى). يجب التخلّي عن فكرة الأثير. إن جميع أطر الإسناد متكافئة. ويجب أن تعطي تجربة ميكلسون – مورلي نتيجة سلبية. سرعة الضوء ثابت لا متغير، وهو واحد في جميع أطر الإسناد القصورية (فرضية آينشتاين الثانية).

الأسئلة

1. اذكر مشاهدة يومية أو إحساساً فيزيائياً يمكن أن نطلق عليها أو عليه بأنه ذاتي subjective. فسر لماذا يكون نسبياً (أي مختلفاً بالنسبة للاحظين مختلفين). على أي معنىً ينطوي الاختلاف disagreement؟

2. اذكر مشاهدة يومية (أو إحساساً فيزيائياً) يمكن أن نسميها مشاهدة موضوعية objective. فسر لماذا تعتبر هذه المشاهدة لا متغيرة invariant (أي أنها تكون واحدة للملاحظين مختلفين).

3. في غياب الاحتكاك، يكون لجميع الأجسام الساقطة بالقرب من سطح الأرض تسارع ثابت g. إن هذا القانون قانون لا متغير بالنسبة لفئة معينة من الملاحظين فقط. (1) صف حالة الحركة لأيّ ملاحظين يتفقان على هذا القانون. (2) صف حالة الحركة لأي ملاحظ لا يتفق مع هذا القانون.

4. إذا وسع جدول الاتفاق والاختلاف الوارد في الجزء 2، ففي أي عمود ينبغي إدراج كل من المفاهيم الآتية (أ) الزخم، (ب) الطاقة الحركية، (جـ) درجة الحرارة (د) الشحنة الكهربائية؟ اشرح سبب اختيارك في كل حالة.

5. ملاحظان ساكنان بالنسبة لبعضهما بعضاً يسندان refer قياساتهما إلى نظامين مختلفين من الإحداثيات. من أية ناحية يمكن أن يختلف وصفهما لمثال معين على الحركة؟

6. يمكننا بكل ارتياح تسمية "نسبية غاليلو" باسم "لا متغيرية غاليلو". لماذا؟

7. رجل واقف على الأرض يقذف بكرة البيسبول baseball، ويلاحظ أن مسارها قطع مكافئ parabola. (1) فهل يكون المسارُ قطعاً مكافئاً أيضاً في إطار إسناد شخص مار بها في قطار يسير بسرعة متجهة ثابتة؟ (2) هل يكون المسار قطعاً مكافئاً في إطار إسناد شخص مار في قطار متسارع؟

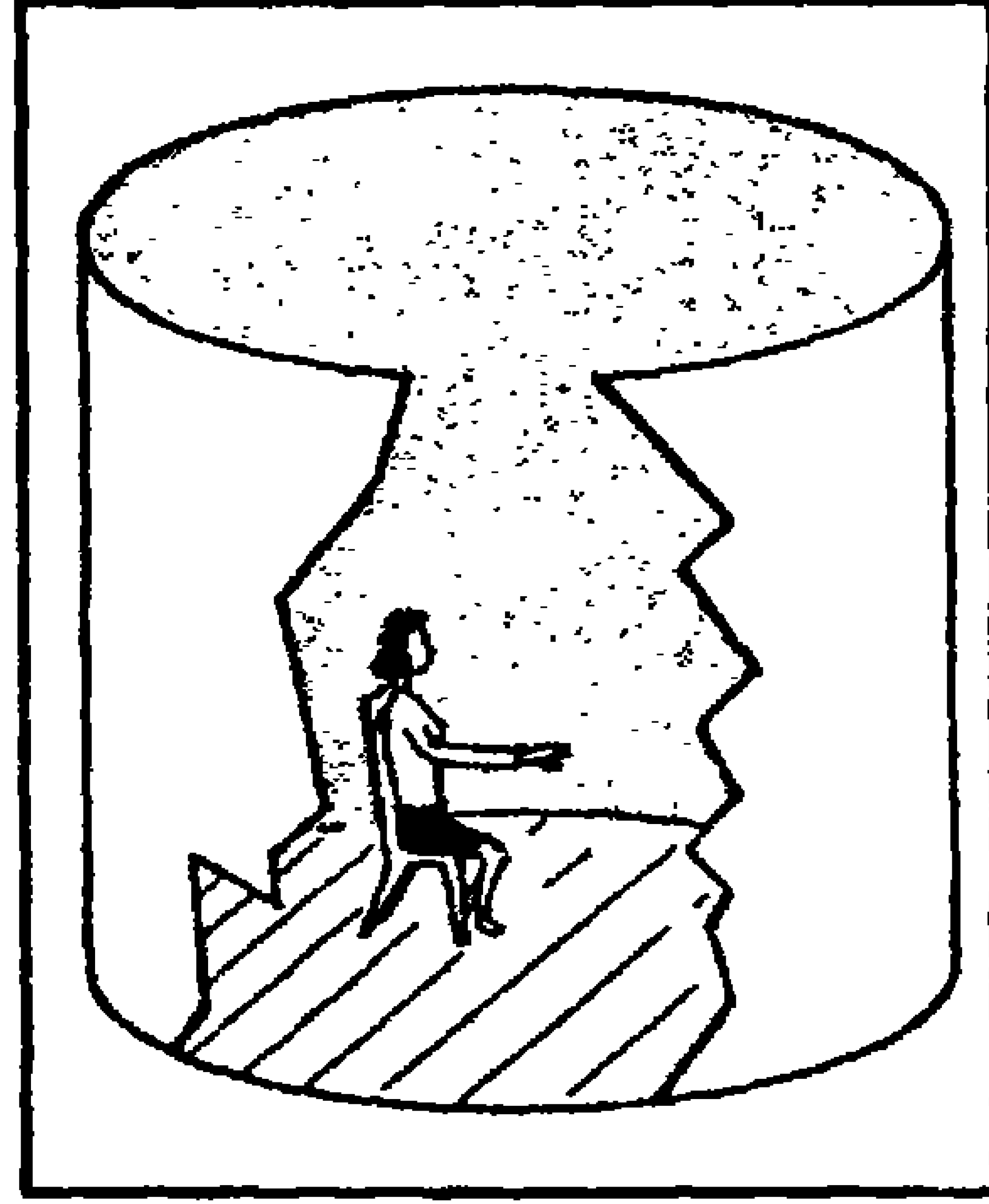
8. وضح بمثال معنى العبارة القائلة إن مجموعة جميع الحركات الممكنة لنظام ما هي واحدة في أي اطاري إسناد قصوريين مختلفين.

9. هل يعتمد المجال المغناطيسي الناشئ عن حركة شحنة على حالة حركة الملاحظ؟ وضح إجابتك بمثال بسيط.

10. اغلق على فيزيائي وأجهزته في عربة قطار من دون شبابيك. صف تجربة بسيطة تمكن الفيزيائي من تعيين التغير في السرعة المتجهة للعربة حتى لو عجز بأية طريقة عن قياس السرعة المتجهة للعربة عندما تتحرك بسرعة متجهة ثابتة.

11. يغفو رجلٌ في قطار في أثناء وقوفه في محطة. وعندما يستيقظ، ينظر من الشباك، ويرى قطاراً على السكة المجاورة يتحرك بالنسبة لقطاره. وحتى يكشف عن أي القطارين يتحرك على الأرض بالفعل، يقرر القيام ببعض التجارب البسيطة. فيتناول كرة رخامية marble من جيبه ويتركها تسقط على الأرض، ثم يدحرجها على الأرض. فهل يستطيع بملاحظته حركة الكرة أن يعين أي القطارين يتحرك بالنسبة للأرض؟ اشرح إجابتك. (اهمل آثاراً كالاهتزاز والاختلاف في استواء مسرى السكة).

12. تلاحظ امرأة جالسة في غرفة أسطوانية (انظر الشكل) أن جدار الغرفة في حركة دورانية بالنسبة لأرض الغرفة. فهل تستطيع، عن طريق إجراء تجارب بسيطة (كتلك الموصوفة في السؤال السابق)، أن تقرر أيهما يدور بالفعل بالنسبة للأرض، الجدار أم أرضية الغرفة؟ إشرح إجابتك.



13. يترجم نظام توجيه قصوري interial guidance system قياسات التسارع إلى معلومات عن السرعة المتجهة والموع. ما العمليات الرياضية التي يجب على الجهاز القيام بها؟

14. خطف مهندس وأجهزته ووضع في مؤخرة عربة مغلقة. وقام المهندس بإجراء قياسات باستمرار منذ اللحظة التي تحركت فيها العربة. وبعد مدة، استنتج أن العربة تتحرك بسرعة ثابتة مقدارها 50 ميل/ س. لماذا لا تتعارض قدرته على الوصول إلى هذه النتيجة مع مبدأ نسبية غاليلو؟

15. اذكر أزواجاً من أحداث شائعة في الحياة اليومية تكون (أ) منفصلة في الزمان لا في المكان (ب) منفصلة في المكان لا في الزمان.

16. اذكر زوجين من الأحداث الشائعة في الحياة اليومية يكونان منفصلين في كلا المكان والزمان بالنسبة إلى أحد الملاحظين، لكنهما منفصلان في الزمان فقط، لا في المكان، بالنسبة إلى ملاحظ آخر.

17. انظر في مرجع مناسب سرعة الصوت في الهواء، والماء، والحديد. (1) كيف ترتبط، بصورة تقريبية، سرعة الصوت في وسط ما مع صلاة hardness الوسط؟ (2) في ضوء هذا الارتباط، ماذا تتوقع أن تكون عليه طبيعة الوسط الذي تنتقل فيه موجة بسرعة الضوء؟ كيف يتلاءم ذلك مع فكرتك عن الأثير؟

18. إشرح في فقرة موجزة لماذا لا يتوقع أن يكون مبدأ النسبية (المبدأ الذي ينص على أن قوانين الطبيعة هي واحدة في جميع أطر الإسناد القصورية) صحيحاً في عالم مليء بالأثير.

19. "يفلت الأثير. من ميكلسون ومورلي والعلماء محتارون". اكتب الفقرة الافتتاحية لقصة اخبارية تتمشى مع عنوان الخبر هذا.

20. ما يشاهد عادة في مقياس تداخل ميكلسون ليس بقعة واحدة من الضوء، بل نمطاً من الأهداب المعتمة والمضيئة المتتابعة. إشرح كيف تحدث إمالة صغيرة tilt لإحدى المرآتين في مقياس التداخل نمطاً من الأهداب fringe pattern.

21. لقد أصبح مقياس تداخل ميكلسون (الشكل 5)، إلى جانب استخدامه في تجربة ميكلسون – مورلي، أداة قيمة للقياسات الدقيقة للطول الموجي. ما الذي ينبغي أن يحدث لنمط التداخل عند تحريك إحدى مرآتي المقياس ببطء لإطالة إحدى ذراعيه؟ اقترح طريقة دقيقة لتعيين الطول الموجي مستفيداً من حركة المرآة هذه.

22. تنص فرضية الابتعاث emission hypothesis (المنسوبة إلى والثر رتز Walther Ritz) على أن الضوء يتحرك بسرعة ثابتة C بالنسبة إلى مصدره. إشرح كيف تفسر هذه الفرضية النتيجة السلبية لتجربة ميكلسون – مورلي.

23. اشرح بطريقتك الخاصة لماذا يحتاج الصوت إلى وسط مادي لانتقاله، بينما لا يحتاج الضوء إلى المادة ولا حتى إلى الأثير.

التمارين

1) كيف يجب تغيير جدول الاتفاق والاختلاف في الجزء 2، للملاحظين في حالة حركة نسبية متسارعة؟

2) يلاحظ جسيم في ثلاثة أطر إسناد قصورية. ففي الإطار ر1 (S1) يهتز الجسيم على المحور س (X)، ويتحدد موضعه بالعلاقة س = أ جا w نـ [X = a sin wt] وفي الإطار ر2 (S2) يخط الجسيم منحنى جيب sine curve. وفي الإطار ر3 (S3) يتحرك الجسيم دائماً في نفس الاتجاه. (1) حدد كيف يتحرك الإطاران ر2 و ر3 (S2 و S3) بالنسبة للإطار ر1. (2) هل هنالك أي إطار إسناد يكون فيه الجسيم ساكنا؟ إذا كان الأمر كذلك، فهل ذلك الإطار إطارٌ قصوري؟

3) إذا كان القطار في الشكل 2 يتحرك إلى اليسار بالسرعة سر (V) بدلاً من اليمين بالسرعة سر (V)، فكيف تتغير معادلات تحويل غاليلو (المعادلات 1 – 4)، هذا إن تغيرت؟

4) اعد كتابة المعادلات 1 – 4 بشكل يجعل جميع المتغيرات التي فوقها فتحة unprimed variables تقع على يسار علامات المساواة وجميع المتغيرات التي ليس فوقها فتحة unprimed variable تقع على يمينها (وبعملك هذا، تكون قد "عكست inverted" تحويل غاليلو) علّق على أهمية تغيير الإشارة الذي يميز المعادلة 1 من "معكوسها"

5) كما هو مبين في الشكل 2، يتحرك إطار إسناد إحداثياه سَ و صَ [X',Y'] بالسرعة سر (V) في اتجاه س (X) الموجب، بينما إطار إسناد إحداثياه س، ص [X,Y] في حالة سكون. غير أن نقطتي الأصل لهذين الإطارين لا تنطبقان عند نـ =

صفر (t = 0)، بل وبدلاً من ذلك، تقع نقطة أصل الإطار المتحرك عند س = س٠، ص = ص٠ عندما نـ = نَـ = صفر [X = Xo و Y = Yo عند t = t' = o]. (1) عمّم المعادلات 1 – 3 لتشمل هذه الحالة. (2) بين أن المعادلتين 5 و 6 تظلان صحيحتين. (3) هل تظل المعادلتان 8 و 9 صحيحتين أيضاً.

6) تقرأ الساعات، في الإطار الساكن ر (S)، الزمن نـ (t). وتدور الساعات في الإطار المتحرك رَ (S') بنفس معدل دوران الساعات في الإطار ر (S) (وهذا هو أحد افتراضات الفيزياء الكلاسيكية). غير أن هذه الساعات ضبطت بشكل مختلف بحيث أن الزمن نـَ (t') الذي تقرأه الساعات المتحركة يتأخر دوماً بمقدار ساعة واحدة عن الزمن نـ (t) للساعات الساكنة. (1) هل يجب تغيير المعادلة 3؟ وإذا كان الأمر كذلك، فبأي طريقة؟ (2) هل يجب تغيير المعادلة 14؟ وإذا كان الأمر كذلك، فبأي طريقة؟

7) يعرف، في بناية ما، المحور س (X) بحيث يتجه شرقاً والمحور ص (Y) شمالاً، والمحور ع (Z) إلى أعلى. وفي مصعد داخل البناية، تعرف المحاور سَ، صَ، عَ (Y', X' و Z') بأنها موازية للمحاور س، ص، ع (Y,X و Z) وتتطابق نقطتا الأصل لنظامي الإحداثيات هذين عند نـ = صفر (t = o). (1) اكتب معادلات تحويل غاليلو (الشبيهة بالمعادلات 10 – 4 إذا كان المصعد يتحرك إلى أعلى بالسرعة سـر (V). (2) اكتب معادلات تحويل غاليلو إذا كان المصعد يتحرك إلى أسفل بالسرعة سـر (V). اختياري: اعد الجزء 1 في حالة عدم انطباق نقطتي أصل نظامي الإحداثيات عند نـ = صفر (t = o).

8) أعد حل المثال 1 في الجزء 3 لمجموعتين أخريين من الشروط الابتدائية:

1. في إطار الإسناد المثبت في القطار، قذفت الكرة إلى الأمام من ارتفاع عـ (h) بسرعة ابتدائية سر (V) (تساوي سرعة القطار).

2. في إطار الإسناد المثبت في القطار، قذفت الكرة إلى الخلف من ارتفاع عـ (h) بسرعة ابتدائية سر (V) (تساوي سرعة القطار.

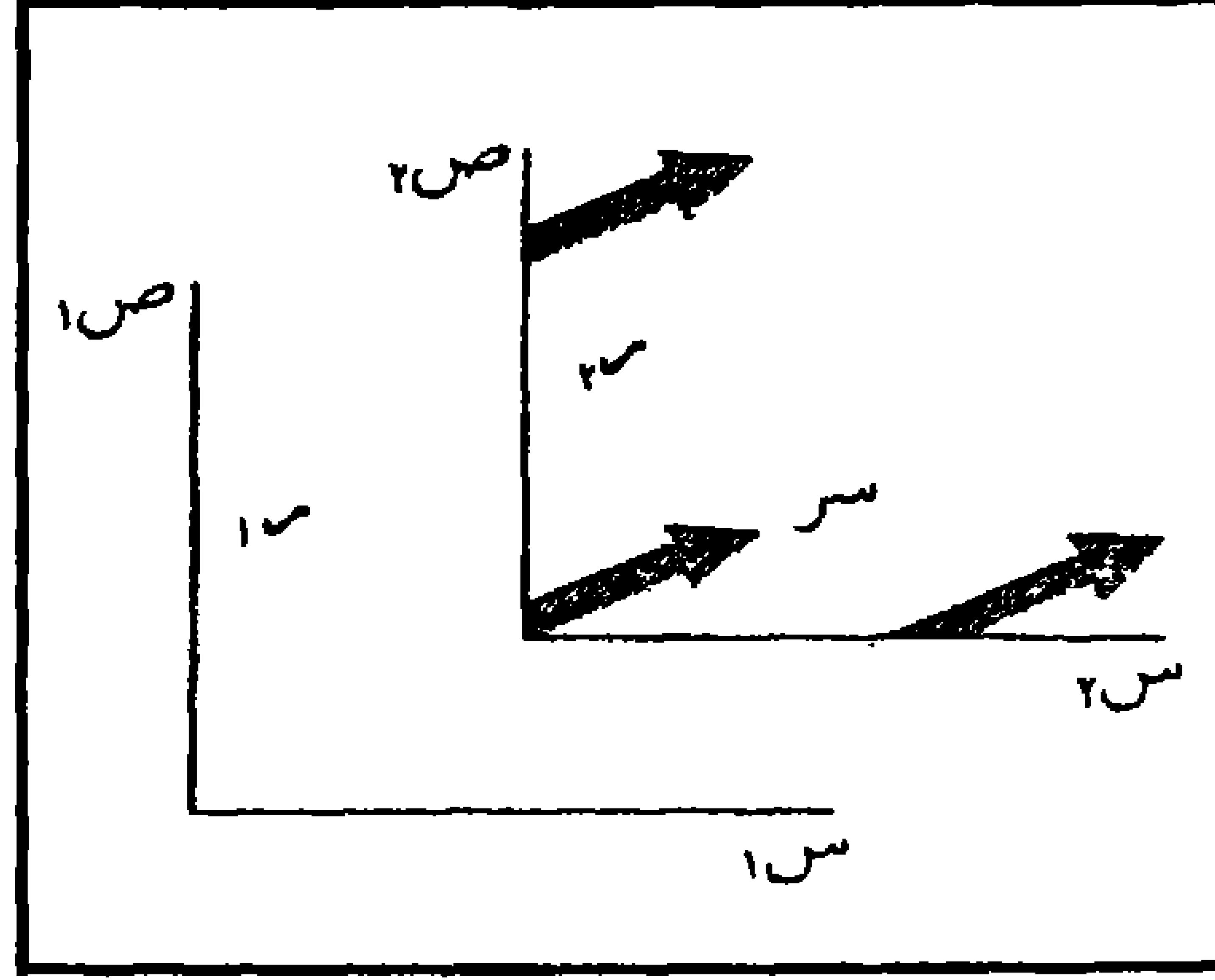
3. في إطار الإسناد المثبت في القطار، قذفت الكرة إلى الخلف من ارتفاع عـ (h) بسرعة ابتدائية سر (V). أعط، في كل حالة تعابير للكميات س (نـ)، ص (نـ)، سَ (نـ)، وصَ (نـ).

9) يدحرج طفلان يقفان عند طرفين متقابلين من عربة قطار كراتٍ أسفل الممر باتجاه بعضهما بعضاً. وتتحرك كلا الكرتين بسرعة سر (Vo) بالنسبة إلى العربة، وتتحرك العربة إلى الأمام بسرعة ثابتة سر (V) بالنسبة للأرض. (1) ما سرعة كل من الكرتين بالنسبة للأرض؟ (2) ما تسارع كل من الكرتين في إطار إسناد مثبت بالأرض؟ (3) إذا بدأت الكرتان بالتدحرج في نفس الوقت، فأيّهما تصل أولاً إلى منتصف المسافة midpoint بين الطفلين.

10) تتحرك عربة قطار فوق خط سكة مستقيم بسرعة ثابتة سر (V) = 10 م / ث. ودفعت كتلة على أرض العربة بحيث عانت تسارعاً إلى الأمام مقداره 0.5م،ث2 بالنسبة إلى العربة. (1) ما تسارع الكتلة بالنسبة إلى ملاحظ على الأرض؟ (2) إذا بدأت الكتلة من السكون في العربة، اكتب تعابير للكمية سَ (X') بدلالة نَـ (t') (إحداثيا الإطار المثبت بالقطار) والكمية س (X) بدلالة نـ (t) (إحداثيا الإطار المثبت بالأرض)، على فرض صحة تحويل غاليلو. (3) قارن س2 – س1 مع سَ2 – سَ1 و نـ2 – نـ1 مع نَـ2 – نَـ1 لأيّ زوجين مختارين من اللحظات نـ1 ونـ2.

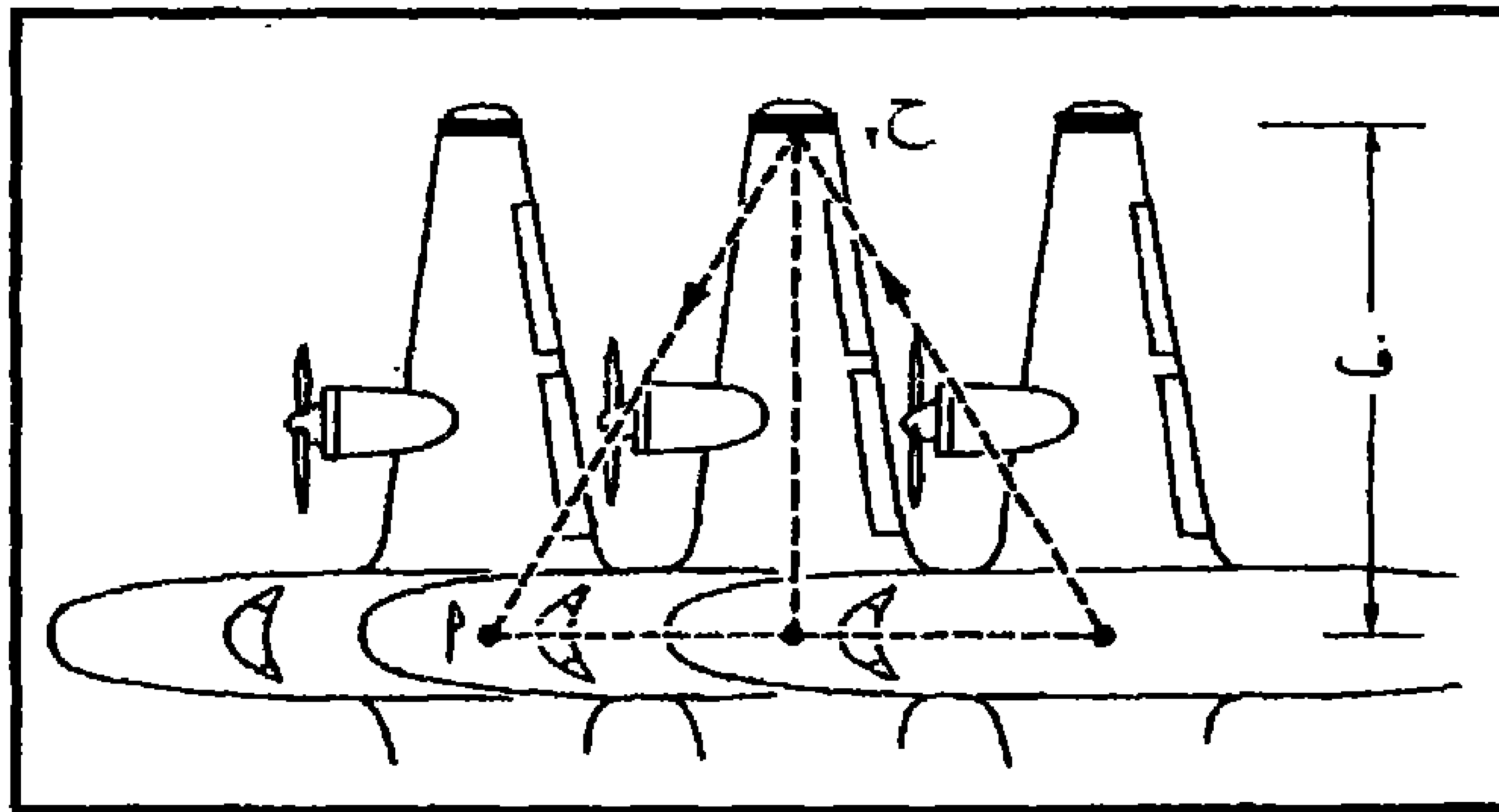
11) يتحرك غلام لا تؤثر فيه أي قوى بسرعة متجهة ثابتة $\overrightarrow{\text{سر}1}$ $(\overrightarrow{V})$ في إطار إسناد ر1 (S)، ويتحرك إطار إسنادٍ آخر ر2 (S) بسرعة متجهة ثابتة $(\overrightarrow{V})$ $\overrightarrow{\text{سر}}$ بالنسبة للإطار ر1 (S) (انظر الشكل). (1) ما السرعة المتجهة للغلام $\overrightarrow{\text{سر}2}$

$\overrightarrow{(V2)}$ بالنسبة لملاحظين في ر2 (S)؟ (2) هل يكون قانون نيوتن الأول صحيحاً في الإطار ر1 (S)؟ هو صحيح في ر2 (S)؟



12) (1) اشرح لماذا تكون القوة التي تعتمد على الإزاحة $\overleftarrow{ر2} - \overleftarrow{ر1}$ ($\overrightarrow{r2} - \overrightarrow{r1}$) بين جسيمين لا متغيرة invariant تحت تحويل غاليلو. (2) اشرح لماذا تكون القوة التي تعتمد على السرعة المتجهة النسبية $\overleftarrow{سر2}$ $\overleftarrow{سر1}$ ($\overrightarrow{V2} - \overrightarrow{V1}$) لجسيمين لا متغيرة تحت تحويل غاليلو.

13) باستخدام الشكل أدناه، اشتق المعادلة 24 لزمن الرحلة ذهاباً وإياباً نـ (صدى طرف الجناح). سرعة الطائرة بالنسبة للهواء هي سرط (Va)، وسرعة الصوت بالنسبة للهواء هي سرص (Vs).



14) (1) اعمل رسوماً توضيحية، بمقياس رسم تقريبي، للمواضع المتعاقبة للطائرة في الشكل 4 عندما (أ) تترك نبضة صوت النقطة أ، (ب) تصل النبضة إلى المرآة مـ1، و(جـ) تعود النبضة إلى النقطة أ، إذا كانت سرعة الطائرة نصف سرعة الصوت. (2) احسب المسافة التي تقطعها الطائرة بين الرسمين التوضيحيين أ و ب والمسافة التي تتحركها بين الرسمين التوضيحيين ب و جـ إذا كانت ف (L) = 6 م.

15) ارسم، لمقياس سرعة الصوت غير العادي المبين في الشكل 4، رسماً بيانياً توضيحياً للزمن نـ (صدى الذيل) بدلالة السرعة سرط (Va) (انظر المعادلة 23). ما سرعة الطائرة سرط (Va) التي لا يعود عندها الصدى إلى النقطة أ؟

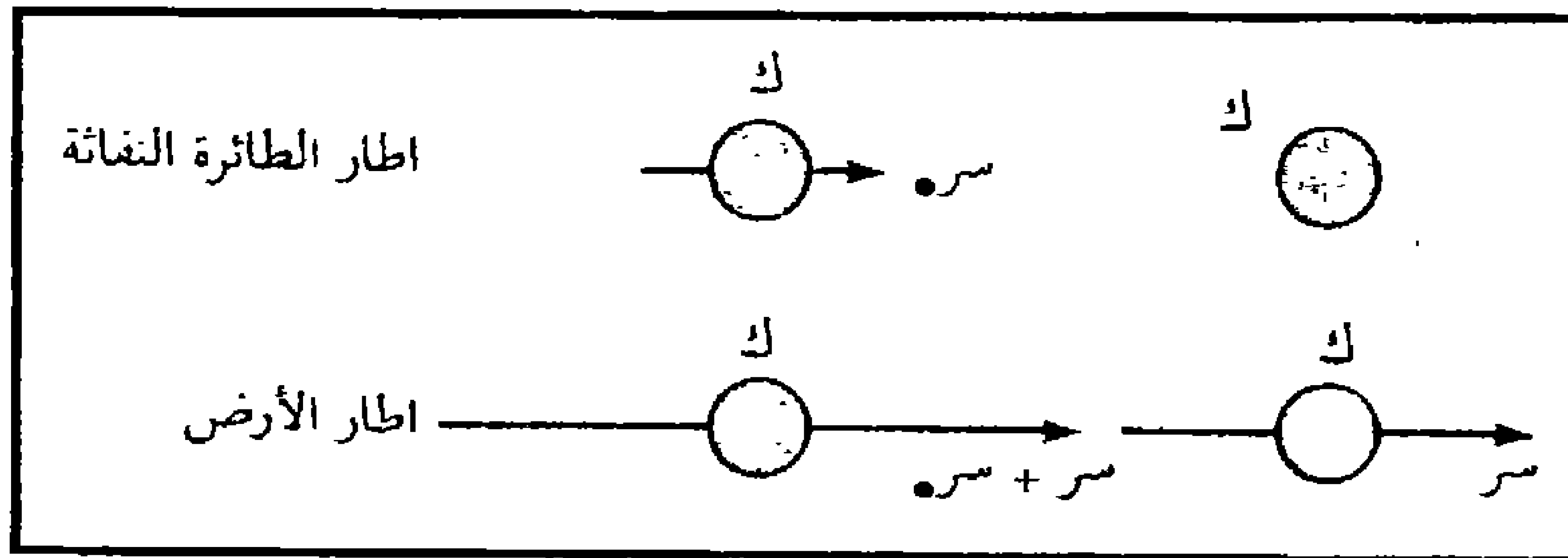
المسائل

1. صمّم أداة بسيطة لقياس التسارع. ضمن التصميم رسماً توضيحياً لكيفية عمل الأداة. هل تعطي الأداة عندما تتحرك بسرعة متجهة ثابتة قراءة تختلف عن قراءاتها عندما تكون ساكنة؟

2. (1) عمم معادلات تحويل غاليلو أي المعادلات 1 – 4 بحيث تأخذ بعين الاعتبار أي اتجاه حركة للإطار المتحرك وإمكان عدم انطباق نقطتي الأصل عند نـ = صفر. (2) اختصر ثلاثا من هذه المعادلات في معادلة متجهة واحدة (Vector Equation).

3. يقذف مسافر في المقعد الأمامي لسيارة متحركة بقطعة حلوى في مسار قطع مكافئ إلى مسافر في المقعد الخلفي. فإذا كانت مركبتا السرعة المتجهة لقطعة الحلوى بالنسبة للسيارة هما سرَس، سرَ ص [V'x و V'y]، وسرعة السيارة هي سر (V). (1) (أ) فاكتب معادلة تربط الطاقة الحركية لقطعة الحلوى في الإطار المثبت بالسيارة بطاقة حركتها في إطار مثبت بالأرض. (ب) ما السرعة سر (V)، إن وجدت، التي تتساوى عندها هاتان الطاقتان الحركيتان؟ (2) (أ) واكتب معادلة تربط المركبة السينية لزخم قطعة الحوى في الإطار المثبت بالسيارة بالمركبة السينية لزخم القطعة في إطار مثبت بالأرض. (ب) ما السرعة سر (V)، إن وجدت، التي عندها تقطع قطعة الحلوى المتحركة نفس المسافة في إطاري الإسناد؟

4. في فترات الاستراحة بين الخطب، يلعب مرشح انتخابي لعبة البولة (pool) في طائرته النفاثة المستأجرة. فهو يضرب كرة، فتتحرك في إطار إسناده إلى الأمام بسرعة سر• (vo) وتصدم مباشرة head-on كرة ساكنة (الجزء العلوي من الشكل أدناه). وفي إطارٍ مثبت بالأرض (الجزء السفلي من الشكل) تكون السرعتان الابتدائيتان للكرتين سر• + سر و سر. اكتب وحلّ معادلتيْ الطاقة الحركية والزخم في كلا إطاري الإسناد من أجل إيجاد السرعتين النهائيتين للكرتين في كلا الإطارين. تحقق من أن مجموعتي الإجابتين ترتبطان بتحويل غاليلو للسرعة المتجهة (المعادلة 5).



5. اعتبر مجموعة من الملاحظين موزعين على امتداد سكة حديد، ولديهم جميعاً ساعات متواقتة synchronized. صفْ طريقة يتمكّن بموجبها الملاحظون من قياس طول قطار يمرّ بهم بسرعة ثابتة. بين باستخدام المعادلتين 11 و 14 أن الطول الذي يعينه هؤلاء الملاحظون يساوي الطول الذي يعيّنه ملاحظ يركب في القطار.

6. ينجذب الجسيم 1 إلى الجسيم 2 بقوة $\vec{ق1}$ [$\vec{F1}$] تعتمد فقط على الإزاحة ر2 – ر1 بين الجسيمين. ويكتب قانون نيوتن الثاني عند تطبيقه على الجسيم 1 على الصورة:

$$\vec{ق1}(\vec{ر2} - \vec{ر1}) = ك1\,\vec{ت1} \qquad [\vec{F1}(\vec{r2} - \vec{r1}) = \overrightarrow{m1a1}]$$

أثبت أن كلا طرفي هذه المعادلة الأيمن والأيسر يكون لا متغيراً تحت تحويل غاليلو [اعتبر ق$\vec{1}$ كدالة متجهة في المقدار ر$\vec{2}$ - ر$\vec{1}$ $(\vec{r2} - \vec{r1})$].

7. لديك إطارٌ ساكنٌ ر، محاوره الديكارتية Cartesian س، ص، ع، وإطارٌ آخر رَ، محاورُه الديكارتية سَ، صَ، عَ، يتحرك في اتجاه س الموجب بتسارع منتظم ت. وعند الزمن نـ = صفر تتطابق محاور الإطارين، وتكون سرعة رَ بالنسبة للإطار ر هي سر. (1) اكتب معادلات التحويل المشابهة للمعادلة 1 – 4 والتي تربط قياسات المكان والزمان للملاحظين في هذين الإطارين. (2) اكتب معادلات تحويل السرعة المتجهة المشابهة للمعادلات 5 – 7.

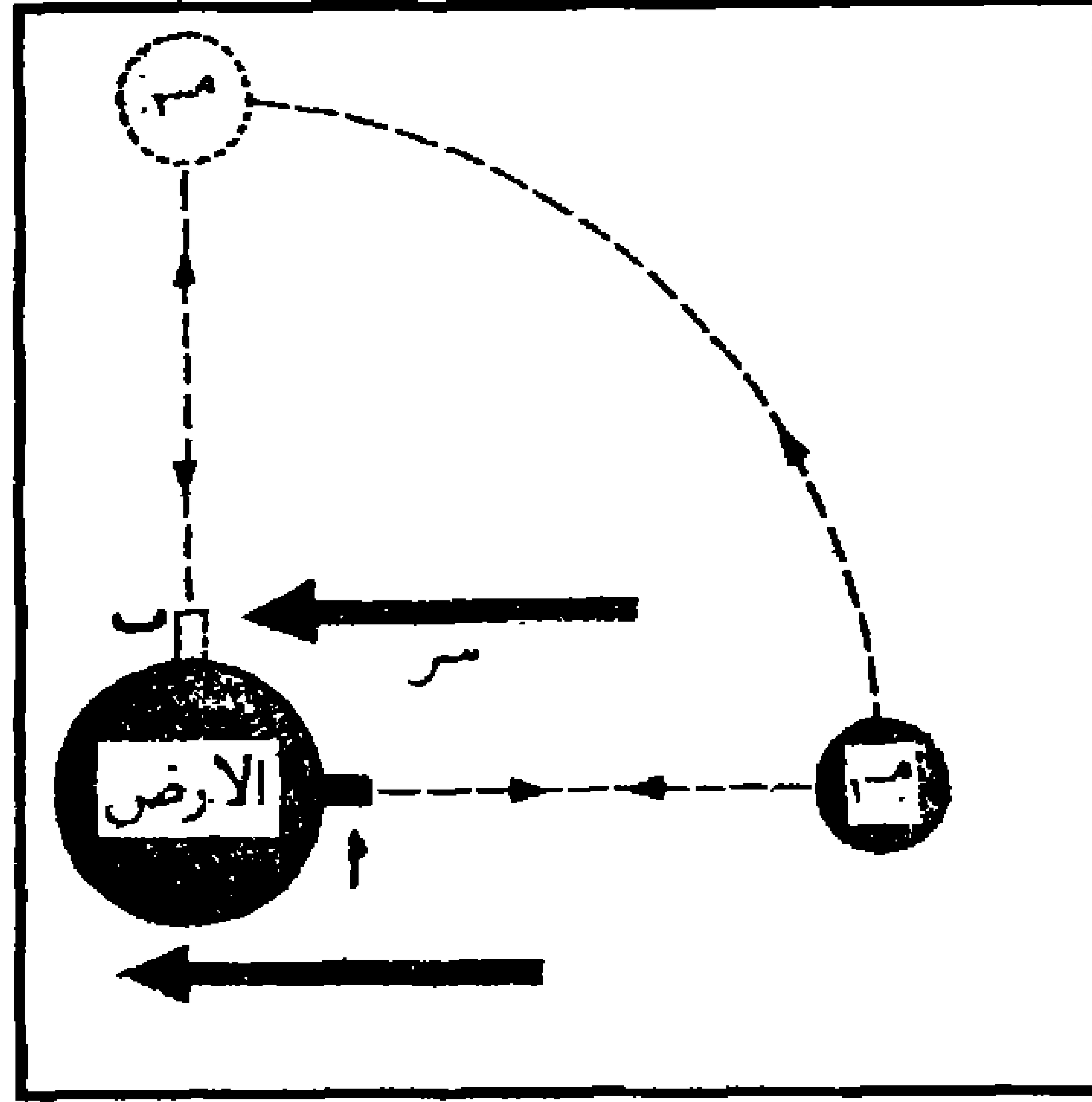
8. لنفرض أن تجربة ميكلسون – مورلي قد أعطت نتيجة إيجابية، مبينة بذلك وجود حركة مطلقة للأرض وكاشفة عن إطار إسناد مفضل. (1) كيف يمكن تعيين اتجاه الشمس وسرعتها في إطار الإسناد المفضّل؟ (2) في عالم افتراضي، له مثل هذا الإطار المفضّل، حيث تظلُّ فيه ميكانيك نيوتن صالحة، فإنه بالإمكان إيقاف فوتون متحرك. اشرحْ سبب ذلك.

9. يقرر عالِمٌ تجريبي استخدام أشعة الليزر المنعكسة عن القمر للكشف عن أثر "الريح الأثيري". وعندما ما يكون تلسكوبه في الموضع أ والقمر في الموضع مـ1، فإنه يقيس بدقة زمن الرحلة ذهاباً وإياباً لنبضة من ضوء الليزر (انظر الشكل أدناه). وبعد أسبوع، عندما يكون التلسكوب عند ب والقمر عند مـ2، فإنه يقيس ثانية زمن الرحلة ذهاباً وإياباً. لنفرض أن الريح الأثيري المفروض يتحرك في الاتجاه المبين بسرعة سر تساوي 10-C4. وللسهولة افرض تساوي المسافتين أ مـ1 وب مـ2.

1) ما الزمن التقريبي ذهاباً وإياباً للضوء المنعكس عن القمر؟

2) ما الفرق التقريبي بين زمني الرحلة ذهاباً وإياباً في القياسين المشار إليهما؟

اختياري: إذا عُرفت المسافتان أمـ1 و ب مـ2 في حـدود 0.3م، وأمكـن قيـاس زمني الرحلة ذهاباً وإيابا في حدود ننوثانية واحدة 1 nsec، فهل تكـون التجربـة ممكنـة من ناحية عملية؟



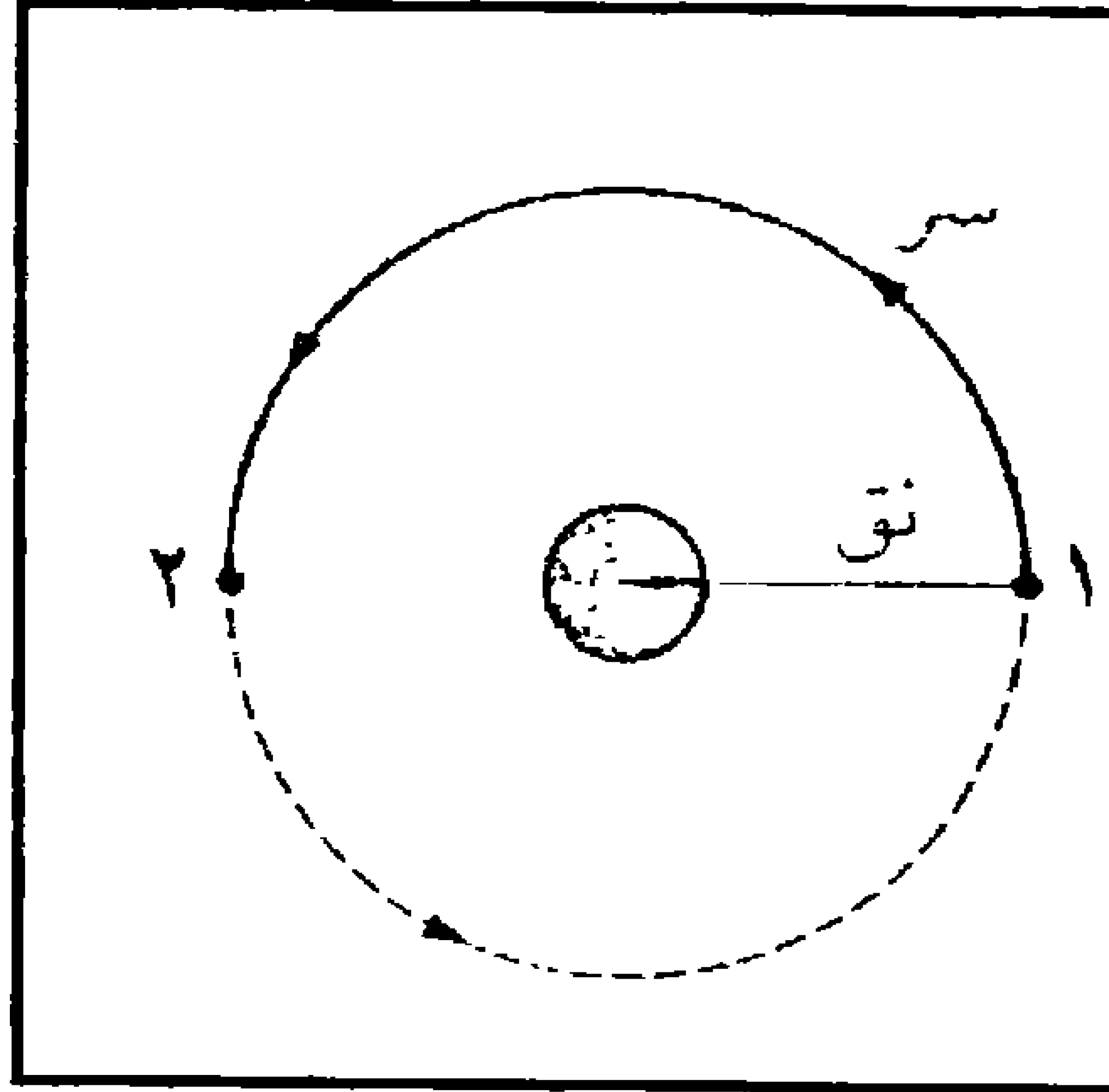
10. افترض جـورج فتـز جرالـد George FitzGerald بـأن المـادة تـنكمش في اتجـاه حركتها عبر الأثير. (1) بين أنـه إذا اسـتخدمت هـذه الفرضـية لتفسـير النتيجـة السـلبية لتجربـة ميكلسـون – مـورلي، فـإن معامـل الانكمـاش لـذراع مقيـاس التداخل "باتجاه الريح ومعاكساً له upwind – downwind" يجب أن يكون:

$$\left[\sqrt{1-(v/c)2}\right] \qquad \sqrt{^{2}\left(\frac{\text{سر}}{C}\right)-1}$$

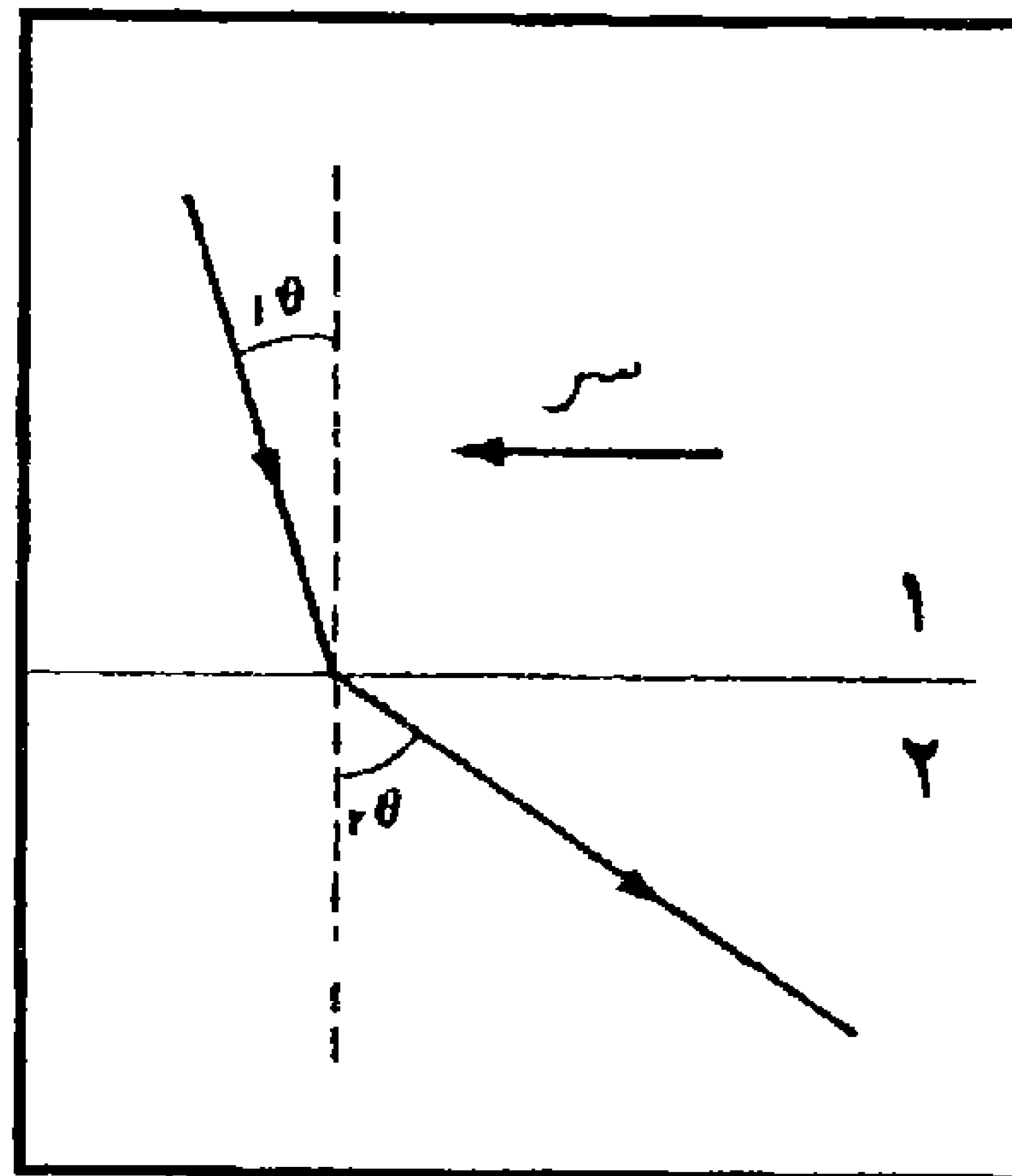
حيث سر (v) هي سرعة الجهاز عـبر الأثـير و C هـي سـرعة الضـوء. (2) مـا التغير، بناء على هذه الفرضية، في طول عصا (طولها مـتر)، النـاتج عـن حركتهـا عـبر الأثير بسرعة سر = 10^{-4} C ؟[V = 10-4C]

11. فرضية رتز للابتعـاث The Ritz emission hypothesis قـد عرّفـت في السـؤال 22 اعتـبر تطبيقها على النظام النجمي المزدوج المبين في الشكل المجاور، حيث يتحرك نجم ثـانوي صـغير بسرعة سر في مسار دائري نصف قطره نق حولَ نجم رئيس ضـخم. وعنـدما يكـون الـنجم الثانوي في الموضع1، ينبعث منه بعض الضـوء الـذي ينتقـل إلى الأرض. وعنـدما يصـبح في

الموضع2، فيما بعد، فإنه يطلق مزيداً من الضوء الذي ينتقل إلى الأرض. ما المسافة التي يجب أن يبعدها النظام المزدوج عن الأرض حتى يبدو النجم الثانوي – حسب فرضية الابتعاث – في الموضع 2 قبل أن يكون في الموضع 1؟



12. المنطقة 1، في الشكل أدناه، تمثل أثيراً يتحرك إلى اليسار بسرعة سر. وتمثل المنطقة 2 طبقة حدية boundary layer "ساكنة" قريبة من سطح الأرض. وبناء على فرضية الطبقة الحدية للأثير، يجب أن يعاني ضوء النجوم انحرافاً عند مروره من المنطقة 1 إلى المنطقة 2. وبفرض أن للضوء السرعة نفسها c بالنسبة للأثير في كلا المنطقتين، اشتقّ علاقة تربط بين الزاويتين 1θ، و 2θ (وبما أن مثل هذا الانحراف لضوء النجوم لم يكشف عنه أبداً، كان من الضروري التخلي عن فرضية الطبقة الحديّة للأثير).



الفصل الخامس

المجال المغناطيسي الأرضي

الفصل الخامس

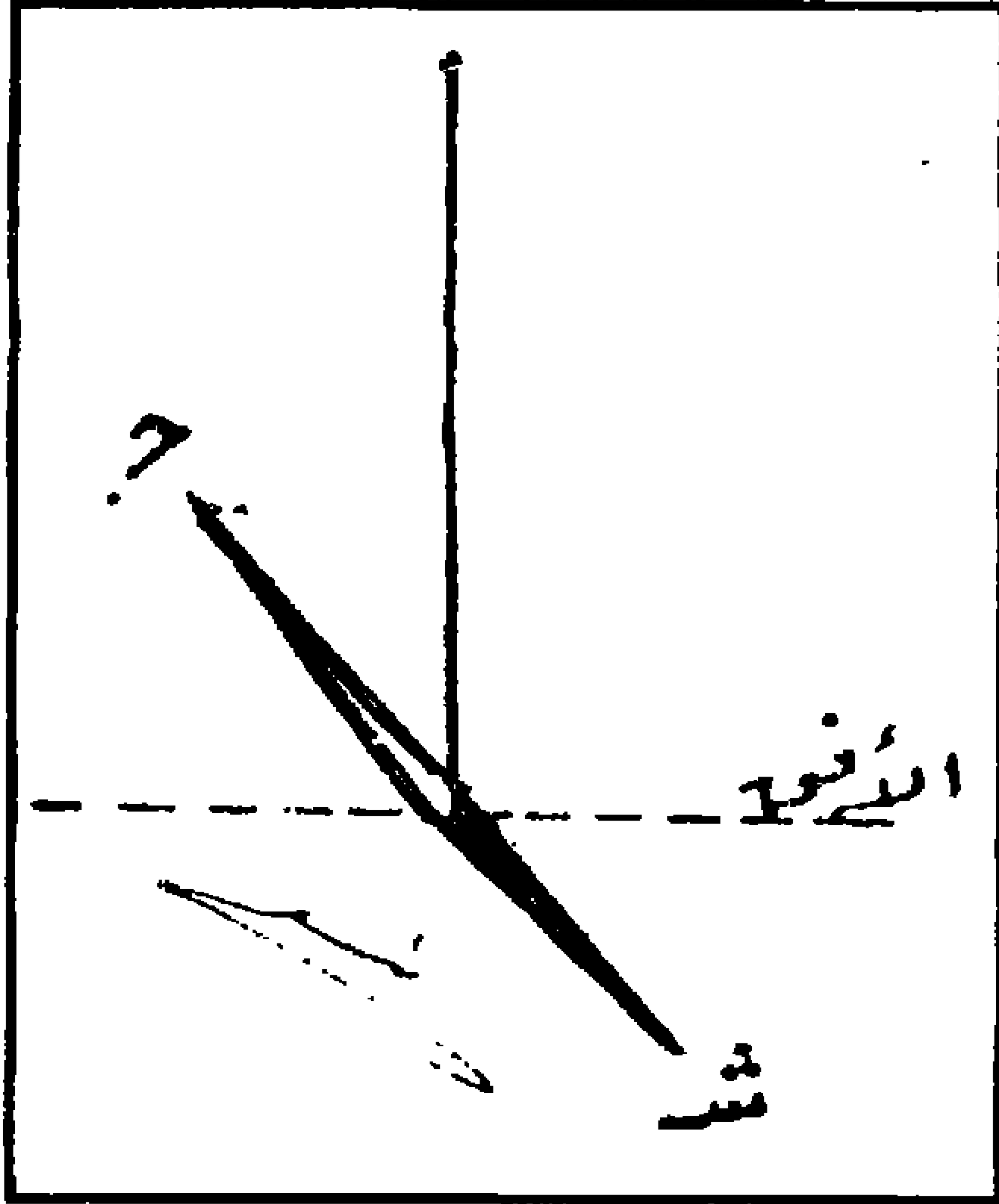
المجال المغناطيسي الأرضي

ملاحظات تجريبية:

1- وجود المجال المغناطيسي الأرضي:

نعلق إبرة مغناطيسية من مركز ثقلها بخيط عديم الفتل (الشكل 1) في مكان خال من أي تأثير مغناطيسي، فنشاهد أن الإبرة تميل على الأفق، وتتزن في وضع معين تعود إليه بعد عدة ذبذبات كلما أزيحت عنه.

وهذا يدل دلالة واضحة على أن الإبرة المغناطيسية تخضع لفعل مجال مغناطيسي مجهول الأصل يغلف الكرة الأرضية ويسمى هذا المجال المجال المغناطيسي الأرضي، ويعين الخط شـ حـ الواصل بين قطبي الإبرة منحى هذا المجال، أما جهته فهي من حـ إلى شـ.



الشكل (1)

وهكذا نرى أن الأرض تشبه مغناطيساً، فيما لو فرضنا وجود كتلة مغناطيسية شمالية وهمية متمركزة في جنوب الأرض، وكتلة مغناطيسية جنوبية وهمية متمركزة في شمالها.

2- مجال التحريض المغناطيسي الأرضي منتظم:

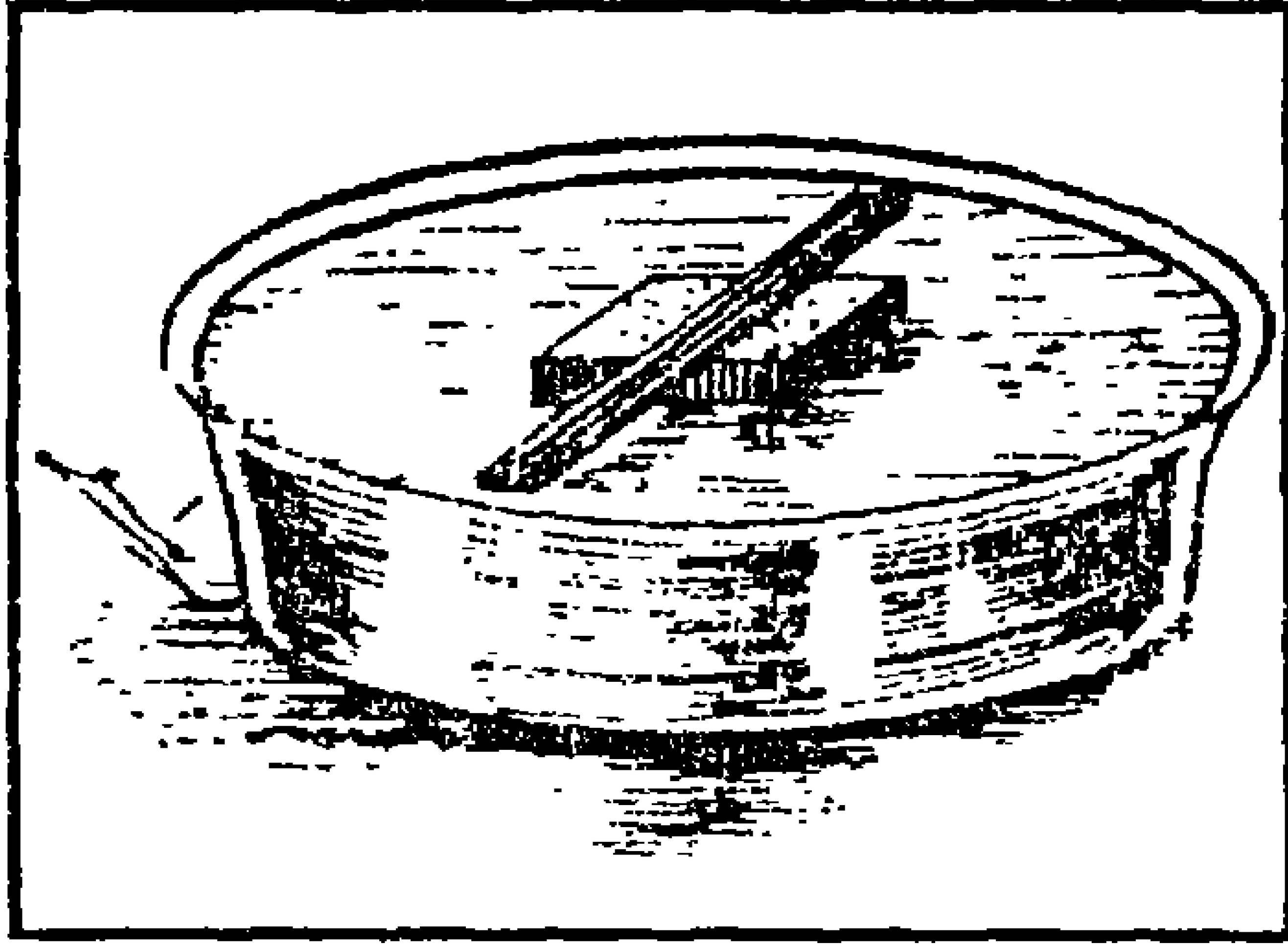
إذا علقنا في غرفة عدداً من الإبر المغناطيسية، نراها جميعها تتزن في أوضاع متوازية وأقطابها الشمالية في جهة واحدة.

فمجال التحريض المغناطيسي الأرضي، هو إذاً مجال تحريض منتظم، في بقعة محددة من سطح الأرض.

3- فعل مجال التحريض المغناطيسي الأرضي:

أ. لا يؤثر مجال التحريض المغناطيسي الأرضي في المغناطيس بقوة شاقولية وحيدة، فالقضيب الفولاذي لا يتغير وزنه بعد مغنطته.

ب. لا يؤثر مجال التحريض المغناطيسي الأرضي في المغناطيس بقوة أفقية وحيدة، فالسلك الحامل للإبرة المغناطيسية يبقى في وضعه الشاقولي.



الشكل (2)

وإذا جعلنا مغناطيساً يطفو على سطح ماء راكد (الشكل 2) بوضعه فوق قطعة من الفلين، نراه لا ينتقل قط وإنما يدور ويأخذ اتجاهاً معيناً، وذلك بفعل مزدوجة يدور حتى يستقر في اتجاه قريب من الشمال الجنوب الجغرافي.

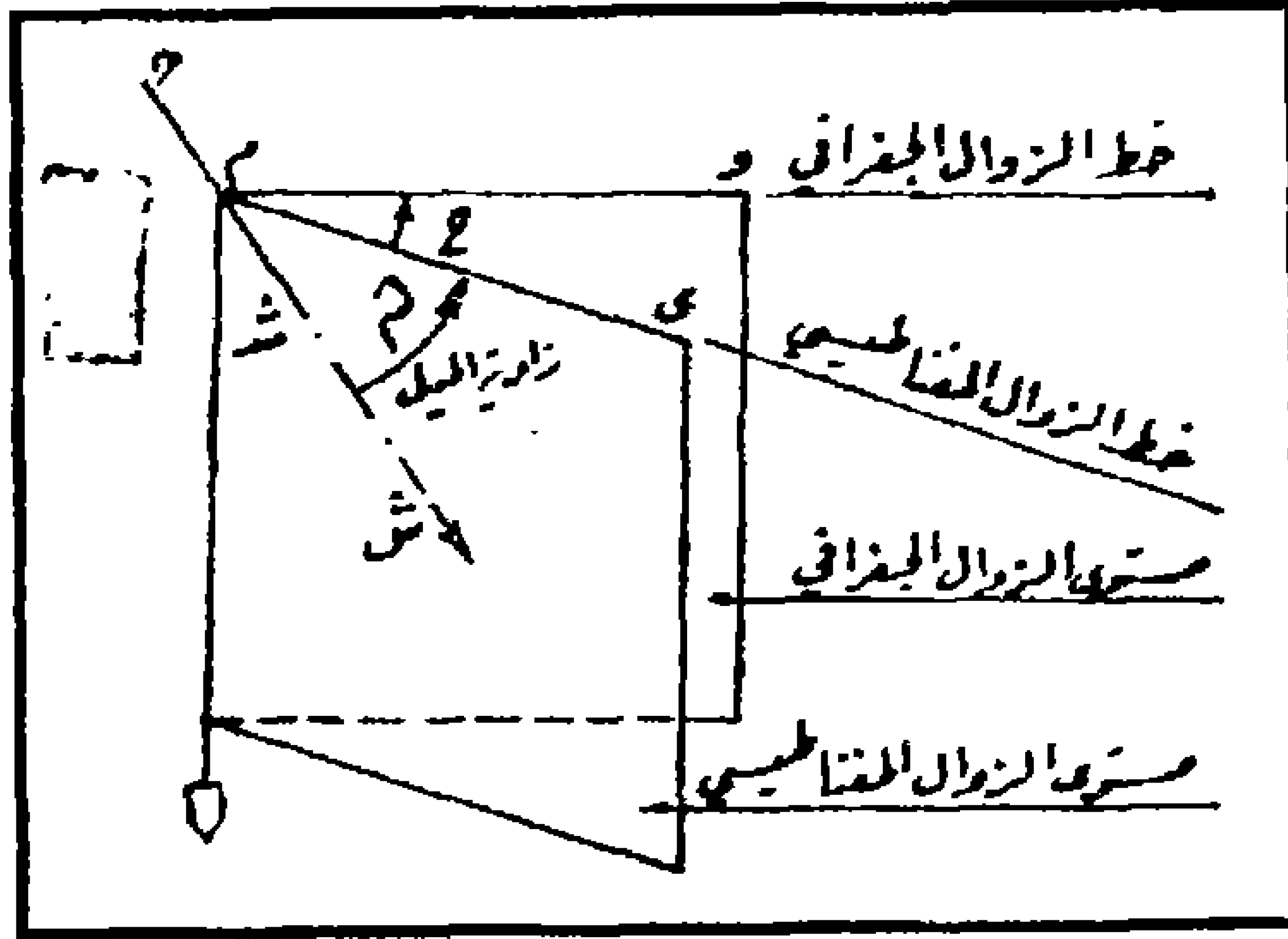
عناصر شعاع التحريض المغناطيسي الأرضي:

يعين شعاع التحريض المغناطيسي في نقطة بمعرفة منحاه وجهته وشدته.

1. **المنحى والجهة:** يعين منحى شعاع التحريض وجهته بواسطة زاويتي الميل والانحراف.

ليكن: ش القطب الشمالي لإبرة مغناطيسية حرة الحركة حول مركز ثقلها م. فالخط م ش يعين منحى وجهة شعاع التحريض المغناطيسي الأرضي، (الشكل 3).

وبالتعريف: يدعى المستوى الشاقولي الذي يحوي الشعاع م ش بمستوى الزوال المغناطيسي، ويدعى أثره "م ى" على المستوى الأفقي المار من "م" بخط الزوال المغناطيسي.

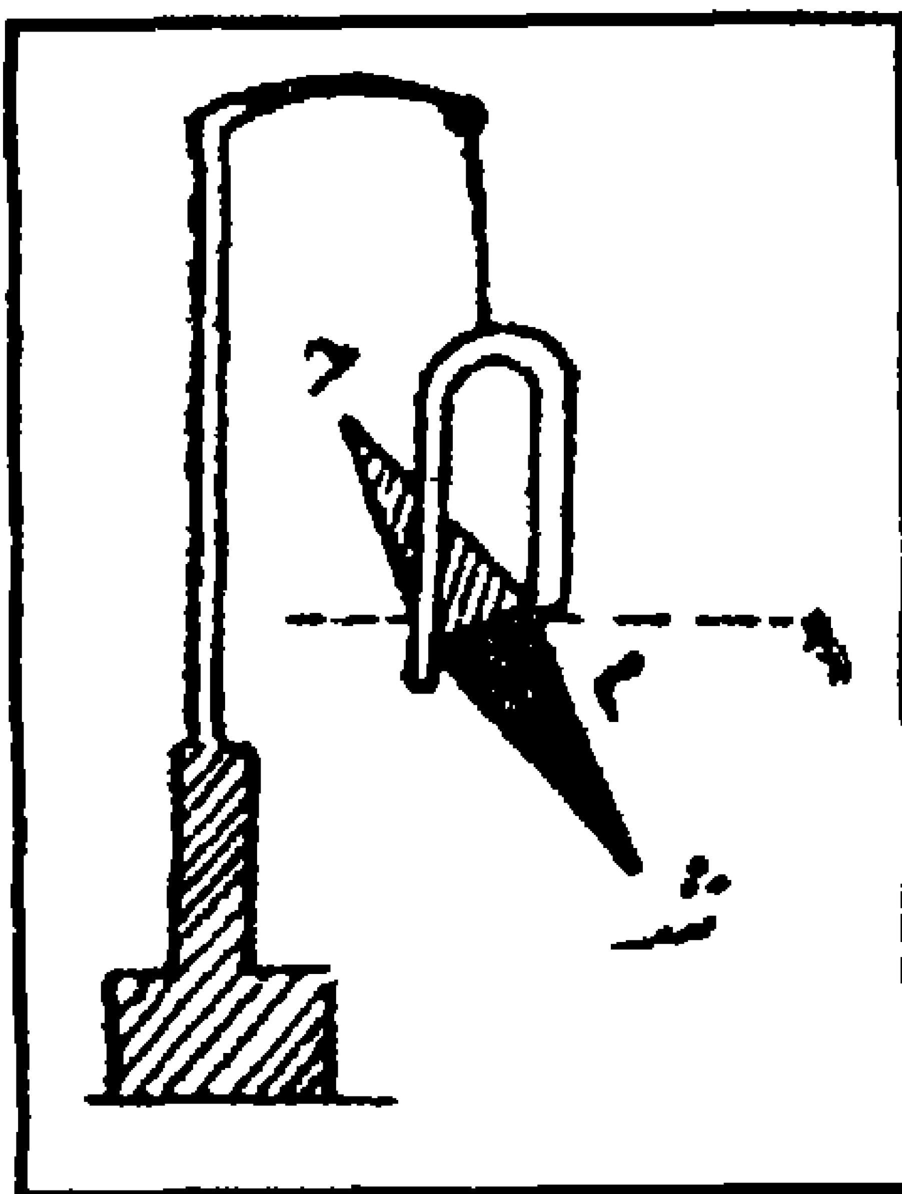


الشكل 3

ويدعى المستوى الشاقولي الذي يحوي النقطة "م" ومحور دوران الأرض مستوى الزوال الجغرافي ويدعى أثره "م و" على المستوى الأفقي المار من "م" خط الزوال الجغرافي.

أ. **زاوية الانحراف:** هي الزاوية ح الكائنة بين خط الزوال المغناطيسي وخط الزوال الجغرافي، أو هي الزاوية الثنائية الكائنة بين مستوى الزوال المغناطيسي ومستوى الزوال الجغرافي. ويكون الانحراف غرباً أو شرقاً حسبما يكون القطب الشمالي للإبرة واقعاً في غرب أو شرق خط الزوال الجغرافي.

ب. **زاوية الميل:** هي الزاوية الكائنة بين منحى شعاع التحريض المغناطيسي الأرضي وخط الزوال المغناطيسي ويعدّ الميل موجباً إذا كان القطب الشمالي للإبرة واقعاً تحت الأفق (الشكل 4) وسالباً إذا كان فوق الأفق.



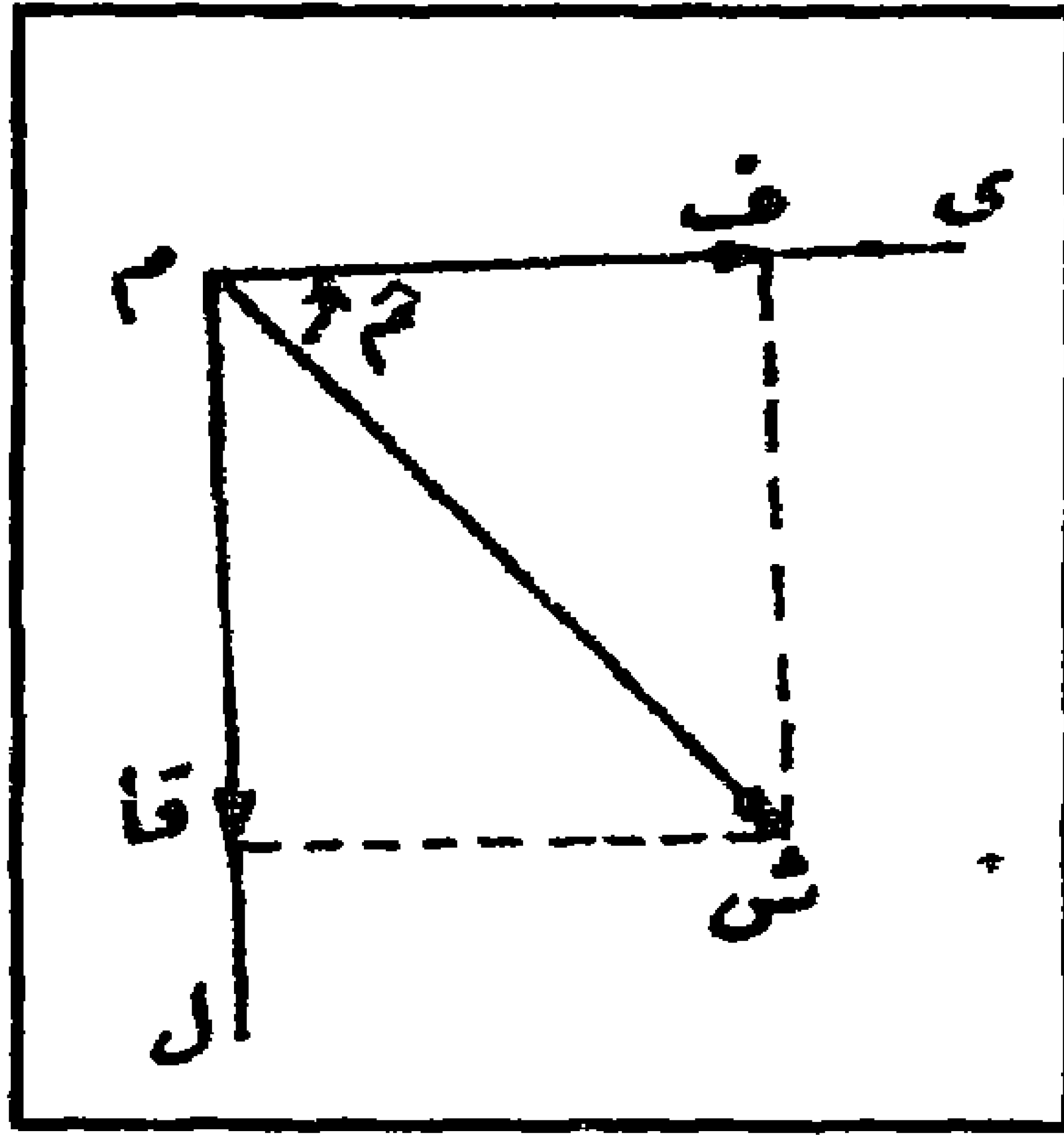
الشكل 4

ج. **شدة الشعاع:** يمكننا تحليل شعاع التحريض المغناطيسي الأرضي م ش إلى مركبتين (ف)، (قا) وفق المحورين م ي، م ل (الشكل 5) فنحصل على المركبة الأفقية ف وعلى المركبة القائمة قا. ومن المثلث القائم الزاوية (م ف ش) نجد:

المركبة الأفقية ف = ش تجب م

المركبة القائمة قا = ش حب م

ولما كنا نلجأ عادة في قياساتنا إلى إبر مغناطيسية تتحرك في مستوى أفقي فقط، كانت المركبة الأفقية ف هي القوة الفعالة الوحيدة. وقيمة هذه المركبة في دمشق 0.25×10^{-4} تسلا.

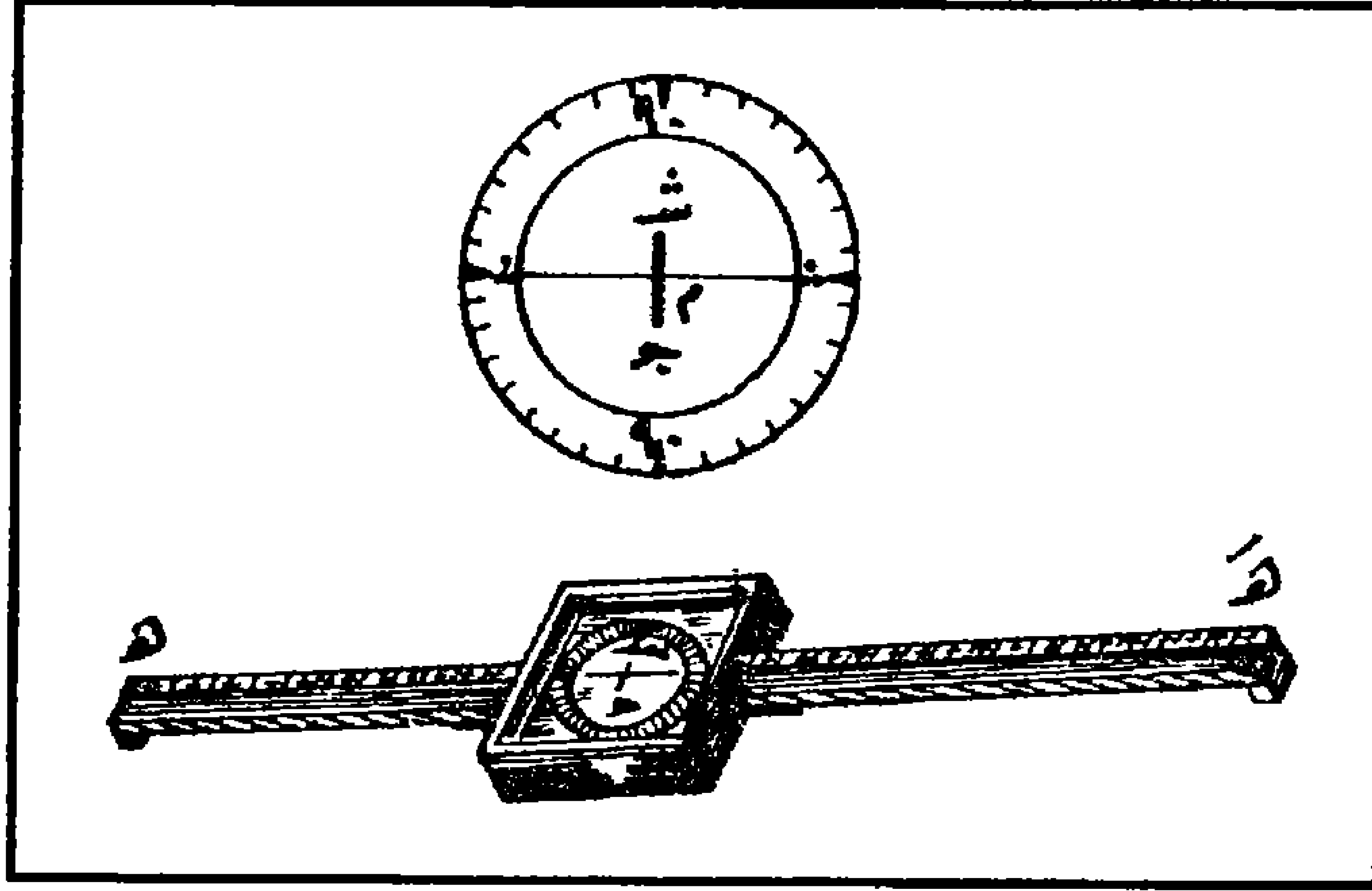


الشكل 5

أما شدة شعاع التحريض المغناطيسي الأرضي في دمشق فهي 0.5×10^{-3} تسلا.

مقياس المغناطيسية (مغناطو متر الانحراف):

يتألف هذا الجهاز من علبة أسطوانية مادتها لا مغناطيسيةن قسم محيط قاعدتها إلى أربعة أقسام متساوية ودرج كل منها من 0° إلى 90°، وقد ثبت في مركز القاعدة محور شاقولي، تتحرك فوقه إبرة مغناطيسية صغيرة ثبت بها سلك رقيق من الألمونيوم عمودي على محورها يدعى بالمؤشر (الشكل 6) وقد ثبتت هذه العلبة فوق مسطرة خشبية هـ هـَ طويلة، درّجت اعتباراً من مركز العلبة م باتجاه الطرفين، علماً بأن خط الصفرين مواز للمسطرة.



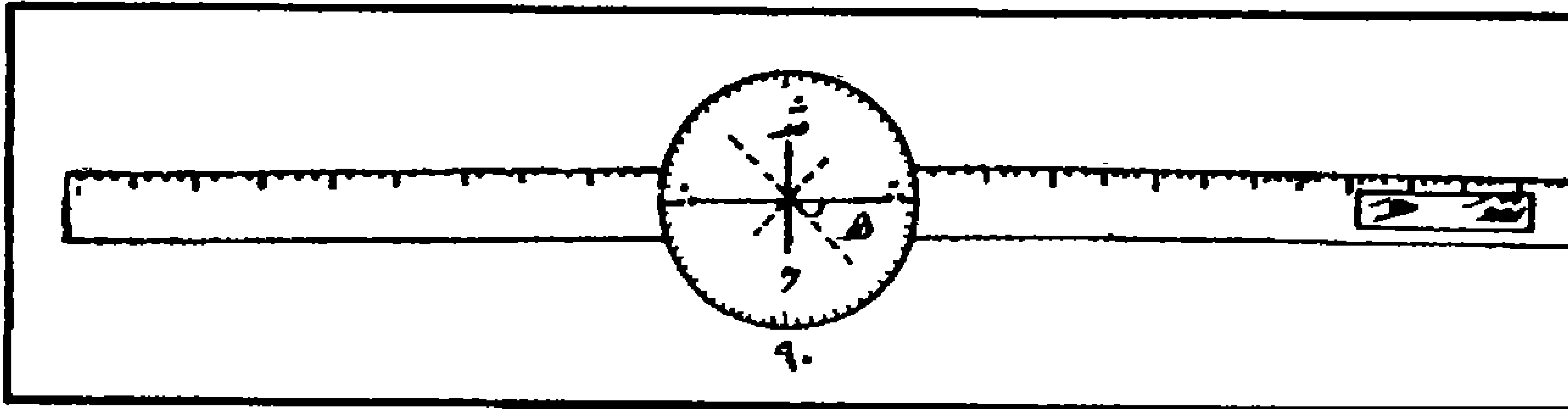
الشكل (6)

ولمقياس المغناطيسية عدة استعمالات منها قياس العزم المغناطيسي لمغناطيس.

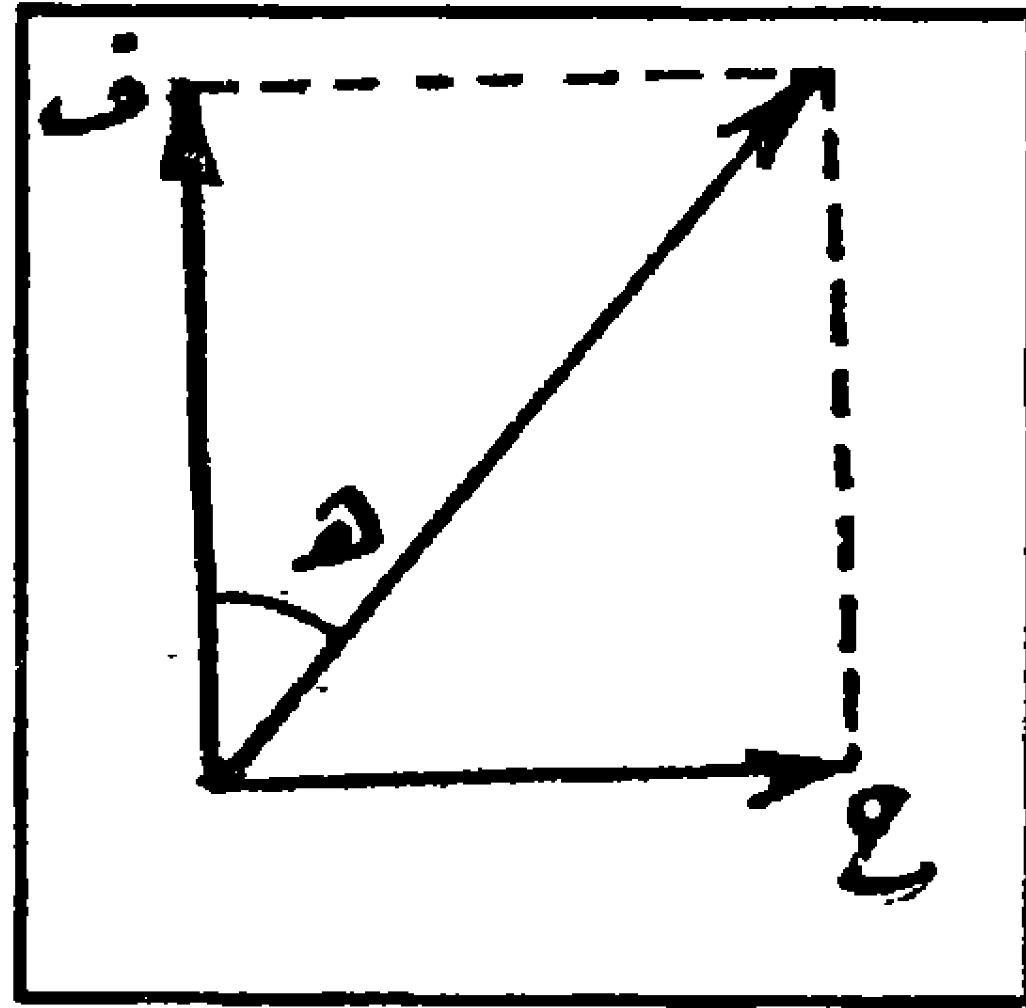
قانون الظل:

نضع مقياس المغناطيسية بصورة يكون فيها خط الصفرين عمودياً على خط الزوال المغناطيسي فعندما تستقر الإبرة يكون المؤشر منطبقاً على خط الصفرين.

لنضع مغناطيساً شَ حَ على المسطرة موازياً لها، بحيث يتجه قطبه الجنوبي مثلاً نحو م كما في الشكل (7) نلاحظ أن الإبرة تنحرف زاوية ما، تمكن قراءتها بوساطة المؤشر، وسبب ذلك الانحراف أن الإبرة كانت مستقرة وفق خط الزوال المغناطيسي تحت تأثير المركبة الأفقية (ف) لمجال التحريض الأرضي، وبعد وضع المغناطيس أصبحت خاضعة بالإضافة لـ ف إلى مجال التحريض الناشئ عن المغناطيس وليكن ح (الشكل 7) فتستقر وفق محصلة المجالين بعد أن تدور بزاوية هـ يمكن حسابها من ظلها وفق العلاقة:



الشكل (7)



الشكل (8)

قراءتها بوساطة المؤشر، وسبب ذلك الانحراف أن الابرة كانت مستقرة وفق خط الزوال المغناطيسي تحت تأثير المركبة الافقية (ف) لمجال التحريض الارضي، وبعد وضع المغناطيس أصبحت خاضعة بالاضافة لـ ف إلى مجال التحريض الناشئ عن المغناطيس وليكن ح (الشكل 137) فتستقر وفق محصلة المجالين بعد أن تدور بزاوية هـ يمكن حسابها من ظلها وفق العلاقة:

$$\text{ظل هـ} = \frac{\text{ح}}{\text{ف}} \qquad (1)$$

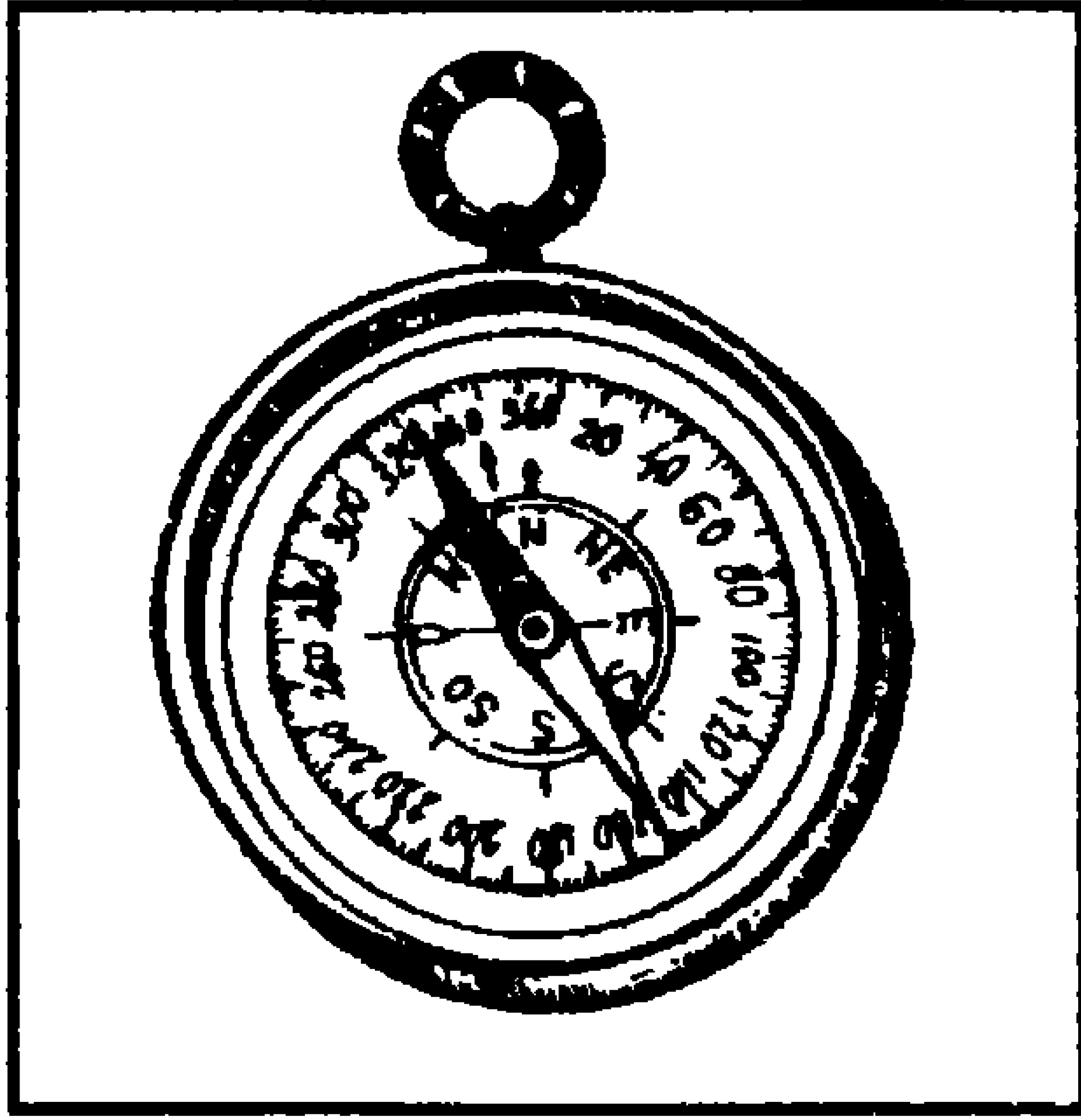
ملاحظة: ينبغي وضع ثقل إضافي على القطب الجنوبي أو الشمالي للإبرة على حسب ما تكون زاوية الميل موجبة أو سالبة ليعاكس فعل المركبة القائمة لمجال التحريض المغناطيسي حتى تبقى الإبرة حرة الحركة تماماً في مستويها الأفقي (الشكل8).

نقاط التعادل الناشئة عن التحريض المغناطيسي الأرضي وتحريض مغناطيسي موضوع فيه:

1. **محور المغناطيس ينطبق على خط الزوال المغناطيسي وقطبه الجنوبي بجهة الشمال الجغرافي:** توجد نقطتا تعادل على امتداد محور المغناطيس ومتناظرتان بالنسبة لمنتصفه وفي كل من هاتين النقطتين يتعادل تحريض المغناطيس (ح تسلا) مع المركبة الأفقية (ف تسلا) للتحريض الأرضي فتكون محصلة التحريضين صفراً.
2. **محور المغناطيس ينطبق على خط الزوال المغناطيسي وقطبه الشمالي بجهة الشمال الجغرافي:** توجد نقطتا تعادل على جانبي المغناطيس وعلى العمود المنصف لمحوره، وهما متناظرتان بالنسبة لمنتصف المغناطيس.

تطبيقات:

أولاً: البوصلة:

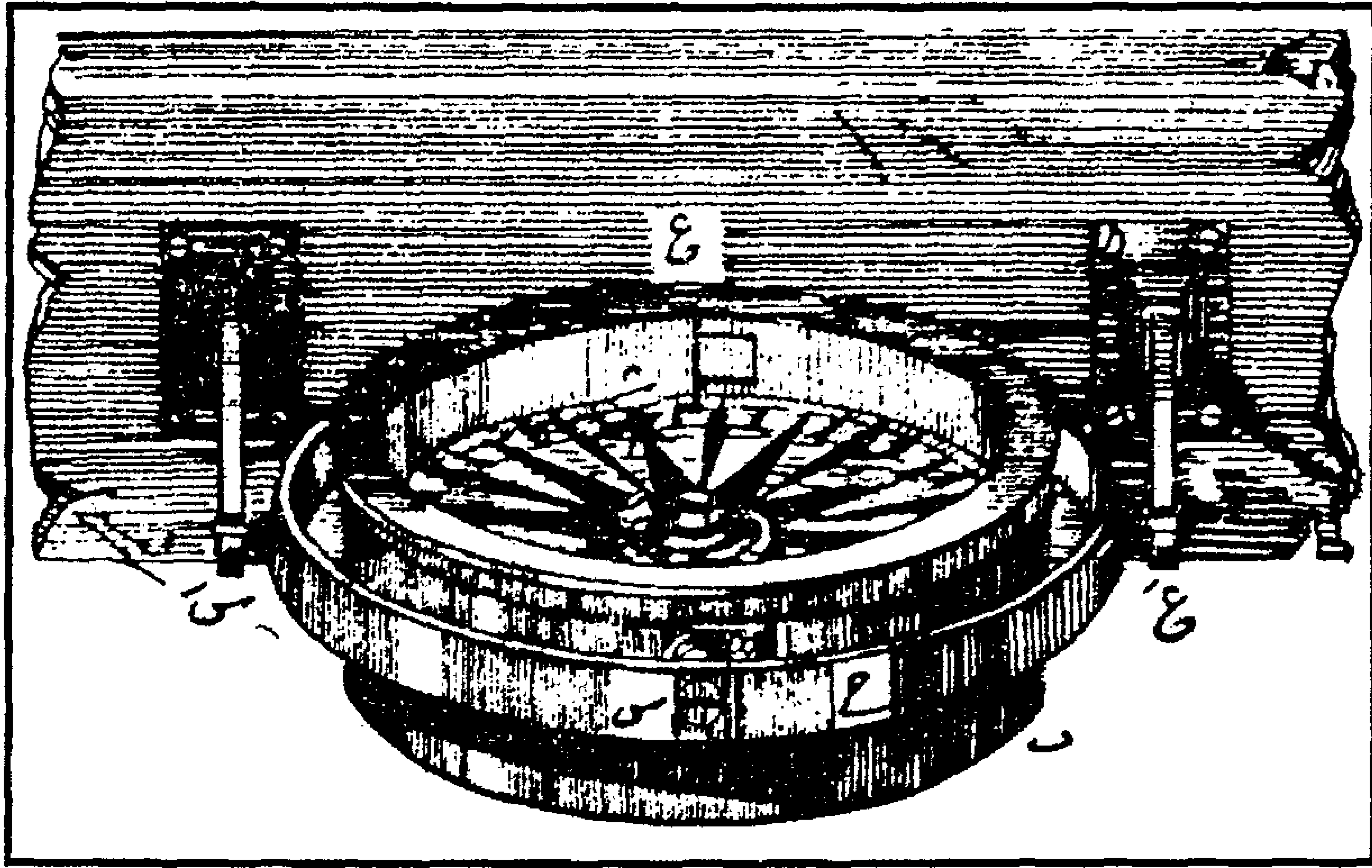


الشكل (9)

تتألف من علبة نحاسية أسطوانية الشكل، وجهها العلوي من الزجاج الشفاف، وقاعدتها مدرجة رسمت عليها الجهات الأصلية والفرعية وجعل عند التدريج (0) حرف (حـ) يرمز لجنوب الأرض. وعند التدريج (180) حرف (شـ) يرمز لشمال الأرض. وفي مركز القاعدة محور رأسي تستند عليه إبرة مغناطيسية، كما في الشكل (9) ولما كان شمال الإبرة يتجه تقريباً نحو الشمال الجغرافي، فإننا نستطيع تحديد خط الاتجاه لمكان ما إذا كنا نعلم زاوية انحرافه، وذلك بإدارة البوصلة حتى يؤلف خط (الشمال – الجنوب) المرسوم في قاعدتها مع اتجاه الإبرة زاوية تساوي زاوية انحراف ذلك المكان.

ثانياً: البوصلة البحرية أو الفرجار البحري:

في هذه البوصلة التي تستعملها السفن نجد أن الإبرة المغناطيسية مثبتة فوق القاعدة المدرجة، حيث تدور معها حول محور رأسي ضمن علبة نحاسية أسطوانية الشكل، حرة الحركة حول محور أفقي ثبت طرفاه بحلقة، وحرة الحركة حول محور أفقي آخر، يتعامد مع السابق وثبت طرفاه بحاجزين ثابتين، وبطريقة التعليق هذه لا تتأثر الإبرة بتماوج السفينة طولياً وتهاديها عرضياً (الشكل 10) كما نجد على جدار العلبة الداخلي إشارتين، يسمى الخط الواصل بينهما خط اليقين، ويجعل هذا الخط منطبقاً على محور السفينة.



الشكل (10)

فإذا أريد التوجه إلى ميناء ما علمت زاوية انحرافه ح، أديرت السفينة بحيث يصنع محورها، أي خط اليقين، مع اتجاه الإبرة زاوية قدرها به ± ح على حسب ما يكون الانحراف غرباً أو شرقاً وحيث به الزاوية التي بين خط اليقين وخط الزوال الجغرافي.

مسائل

1) تبلغ المركبة الأفقية للتحريض الأرضي في مكان 196×10^{-7} تسلا وزاوية الميل 60°، ويطلب حساب التحريض الأرضي ومركبته القائمة في ذلك المكان.

الأجوبة: ح = 392×10^{-7} تسلا

قا = 237×10^{-7} تسلا

2) تتحرك إبرة مغناطيسية حول محور شاقولي ويؤثر بها التحريض الأرضي وتحريض منتظم عمودي على مستوى الزوال المغناطيسي فتستقر وتؤلف مع هذا المستوى زاوية 60°، احسب التحريض الثاني. تفرض المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

الجواب: 346×10^{-7} تسلا

3) وضعت إبرة مغناطيسية عزمها المغناطيسي 0.1 وحدة عزم في الجملة الكهربائية العملية متعامدة مع مستوى الزوال المغناطيسي. أوجد عزم المزدوجة المؤثرة بها إذا كانت المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

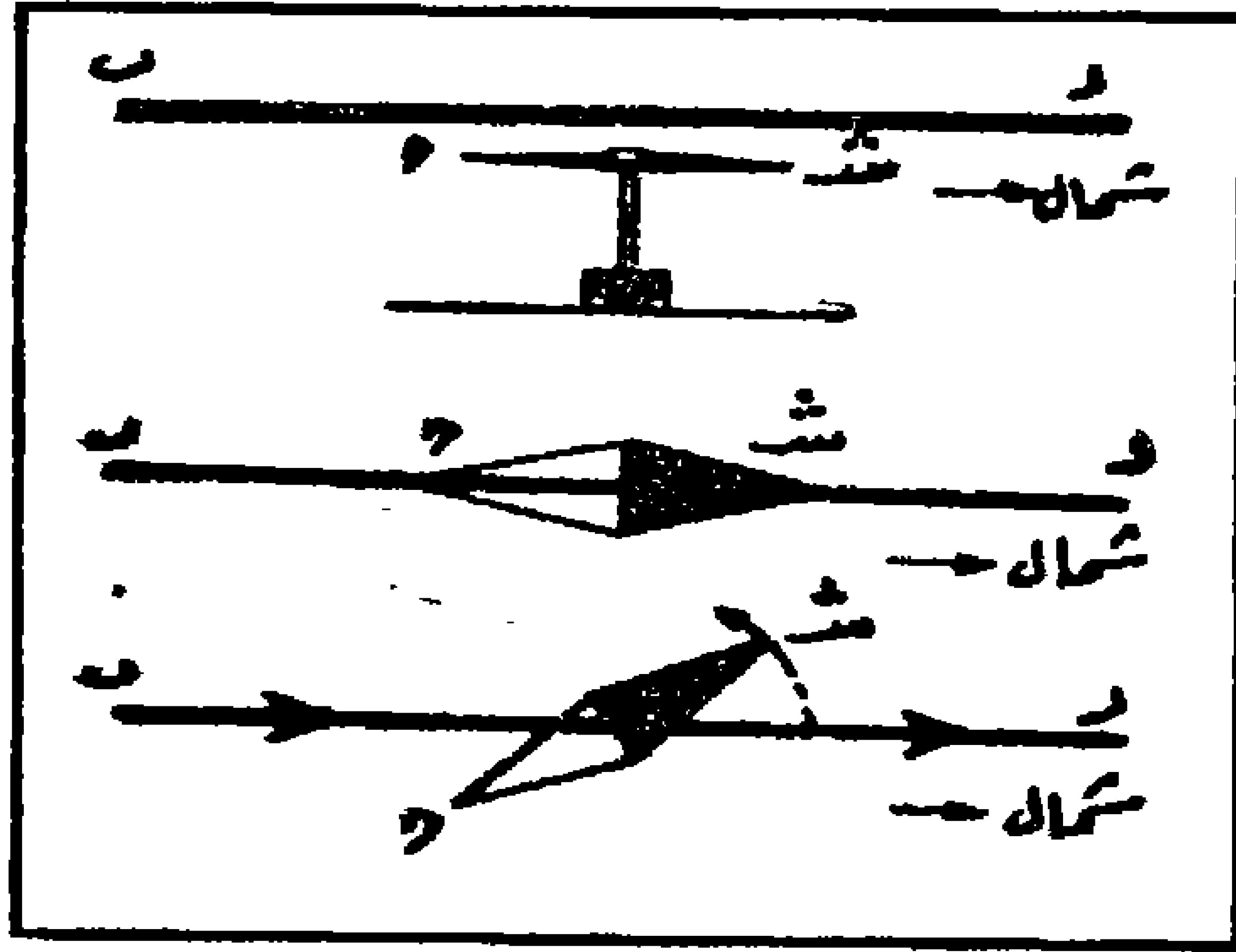
الجواب: 2×10^{-6} م × نيوتن

المجالات المغناطيسية للتيارات الكهربائية

المقياس الغلفاني ذو المغناطيس المتحرك:

تجربة أساسية:

أمر أورستيد تياراً متواصلاً في السلك ب د الموازي لإبرة مغناطيسية، فلاحظ أن الإبرة تنحرف في اتجاه ما، ويتوقف هذا الاتجاه على جهة التيار وعلى وضع الإبرة بالنسبة للسلك (الشكل 11) وبما أن الإبرة لا تنحرف إلا بتأثير تحريض مغناطيسي، إذاً فهذا الانحراف دليل واضح على أن للتيار الكهربائي مجالاً مغناطيسياً وسندرس فيما يلي المجال المغناطيسي للتيار المتواصل في عدة حالات.



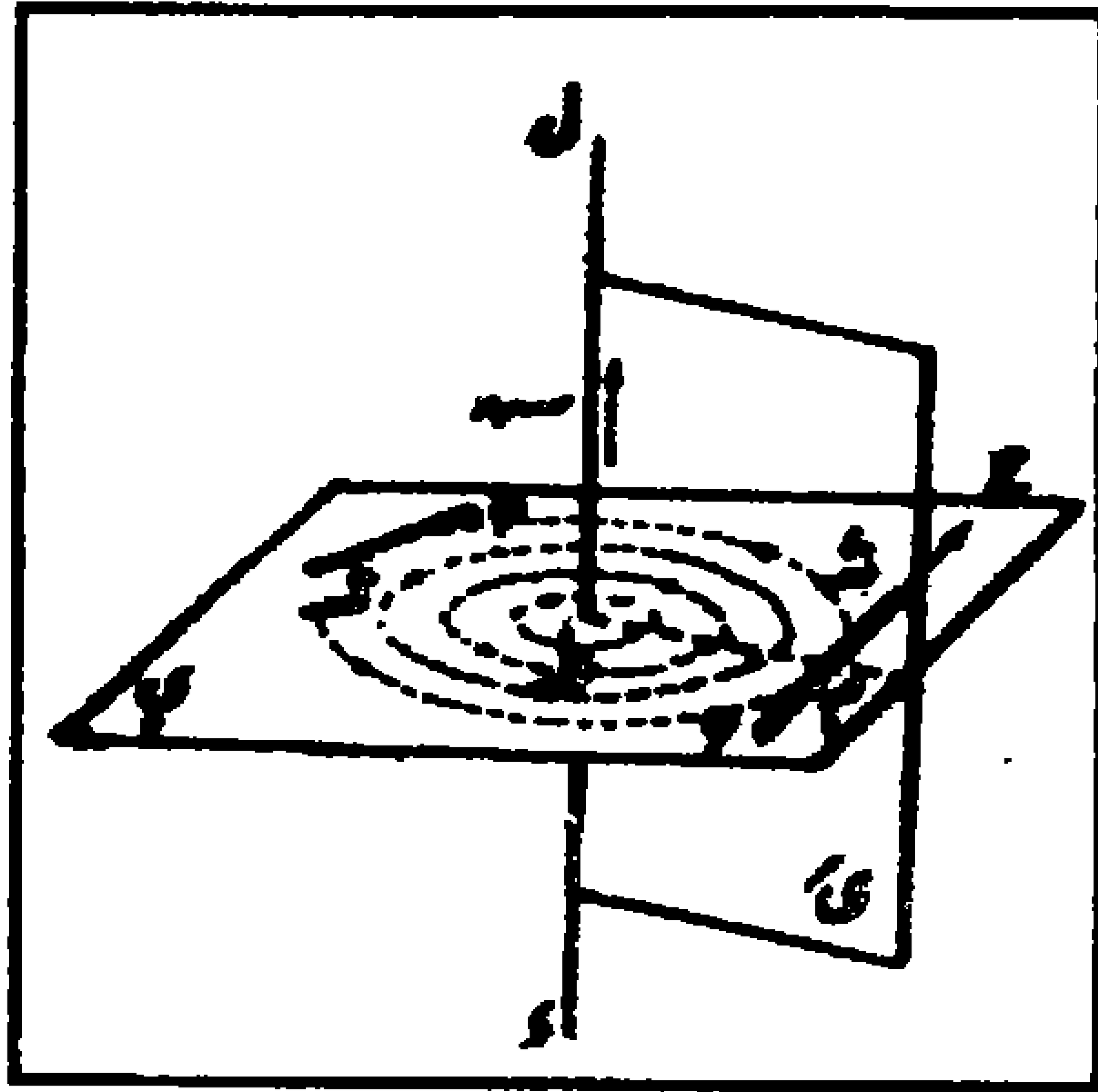
الشكل (11)

المجال المغناطيسي لتيار كهربائي يمر في سلك مستقيم غير محدود:

لنجعل سلكاً نحاسياً غليظاً يخترف رأسياً قطعة أفقية من الورق المقوى، ولننشر على الورقة برادة الحديد ونمر في السلك تياراً كهربائياً شديداً (10 آمبير تقريباً). ونرج الورقة رجات خفيفة، فنشاهد أن برادة الحديد تنتظم وفق خطوط القوى

المغناطيسية وترسم طيفاً مغناطيسياً بشكل دوائر متحدة المركز (الشكل 12) مستواها عمودي على التيار ويقع مركزها على محور السلك.

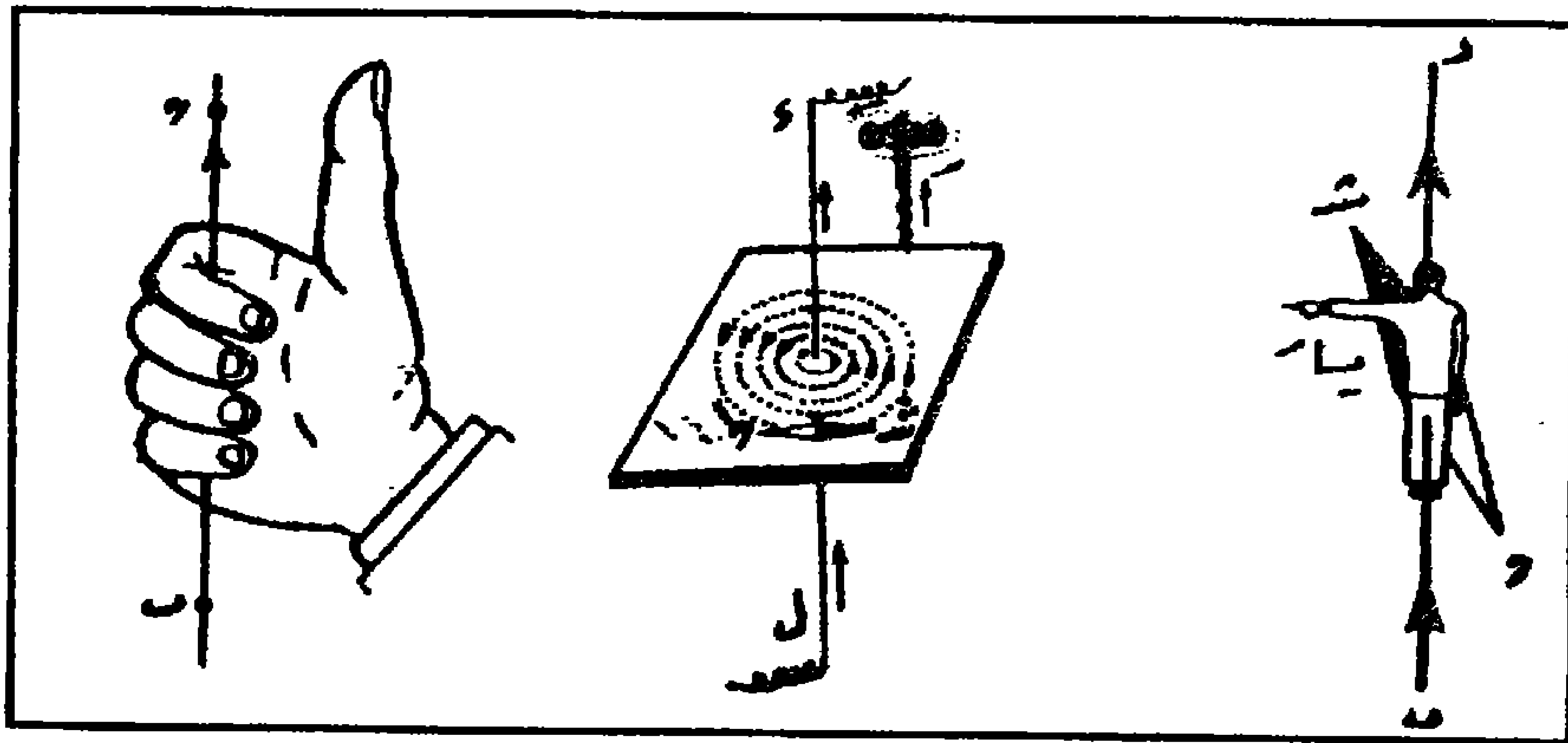
وتتعين جهة خطوط القوى لهذا المجال، عملياً، بوساطة إبرة مغناطيسية صغيرة معلقة بخيط عديم الفتل، ننقلها إلى نقاط مختلفة وقريبة من سطح الورق المقوى،



(الشكل 12)

فنجدها تسكن مماسة لخطوط القوى الدائرية التي رسمتها برادة الحديد فيكون اتجاه حـ شـ اتجاه خطوط القوى، ويعين اتجاه خطوط القوة نظرياً بطرق مختلفة منها:

أ. قاعدة إنسان آمبير: (تخيل (آمبير) إنساناً منطبقاً على السلك ب حـ بحيث يجتازه التيار من رجلية إلى رأسه، ينظر هذا الإنسان إلى القطب الشمالي للإبرة فيجده منحرفاً نحو يساره (الشكل 13)، وهذا الاتجاه هو اتجاه خطوط القوى المغناطيسية.



الشكل (13) الشكل (14) الشكل (15)

ب. **قاعدة مكسويل:** تخيل مكسويل أنه يدير بزالاً (بريمة) (الشكل 14) بحيث يتقدم البزال باتجاه التيار في السلك الذي يخترق لوح المقوى رأسياً فوجد أن اتجاه د-وران البزال هو اتجاه خطوط القوى المغناطيسية.

ج. **قاعدة اليد اليمنى لامبير:** نجعل إبهام اليد اليمنى يشير إلى اتجاه التيار، ثم تتخيل أننا نقبض باليد نفسها على السلك ب حـ الذي يجتازه التيار، فاتجاه باقي الأصابع (الشكل 14) يدل على اتجاه خطوط القوى المغناطيسية.

وقد أثبتت القياسات أن شدة التحريض المغناطيسي المتولد من مرور تيار كهربائي في سلك مستقيم غير محدود تتغير من نقطة لأخرى.

1. فهي تتناسب طرداً مع شدة التيار الكهربائي المار في السلك.
2. وتتناسب عكساً مع ب بعد النقطة عن السلك. فإذا فرضنا ح شدة المجال المتولد يكون:

$$ح = ثا \times \frac{ش}{ب}$$

وفي الجملة الكهربائية العملية تقدر ح بالتسلا و ش بالأمبير و ب بالمتر فتكون:

ثا= $\frac{2}{{}^{7}10}$ وتصبح شدة التحريض ممثلة بالعلاقة الآتية:

$$ح_{تسلا} = \frac{2}{{}^{7}10} \times \frac{ش}{ب} \qquad \frac{أمبير}{متر}$$

والخلاصة: يولد التيار المار في سلك مستقيم غير محدود حوله مجالاً مغناطيسياً، نميز في كل نقطة من نقاطه شعاع تحريض عناصره هي:

مبدؤه: النقطة المعتبرة.

منحاه: العمود على المستوى المعين بالسلك وبالنقطة المعتبرة.

جهته: تعين بإحدى القواعد التي عينت بها خطوط القوة.

شدته: $ح = \frac{2}{{}^{7}10} \times \frac{ش}{ب}$

تطبيق عددي:

ما شدة التيار في سلك مستقيم يولد على بعد 5 سم منه تحريضاً شدته تساوي المركبة الأفقية للتحريض الأرضي (2×10^{-5} تسلا).

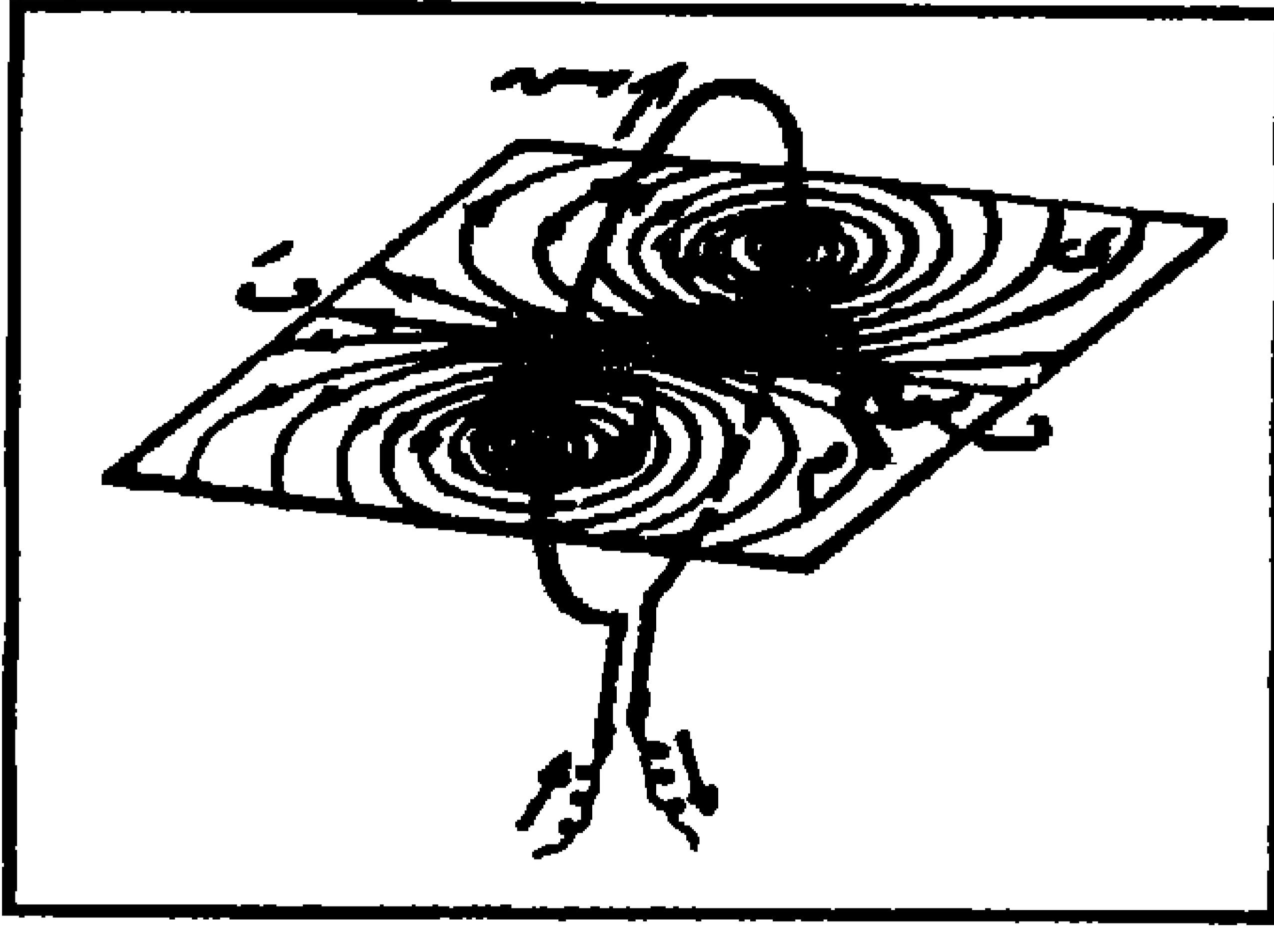
لدينا إذاً ح = 2×10^{-5} تسلا من أجل ب = 0.05م.

فتكون ش = $\frac{10^7}{2}$ × ح × ب = $\frac{10^7}{2} \times 2 \times 10^{-5} \times 0.05$

أو ش = 5 آمبير.

المجال المغناطيسي لتيار كهربائي يمر في سلك دائري (ملف دائري):

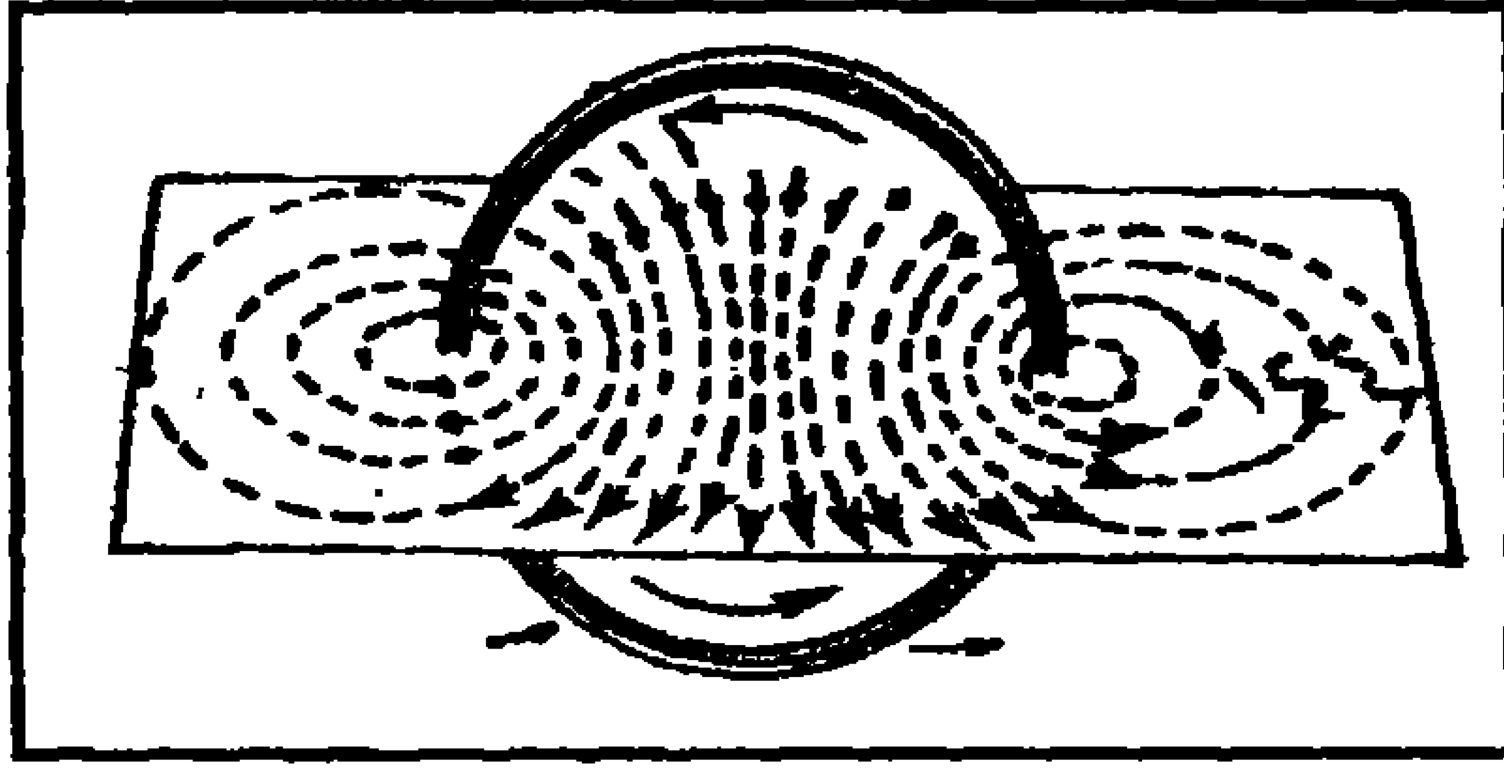
نأخذ سلكاً نحاسياً غليظاً دائرياً يتعامد مستويه مع صفيحة أفقية من الورق المقوى تمر من مركز السلك فيخترق السلك الصفيحة من نقطتين د، ل (الشكل 15) نثر برادة الحديد على الورق المقوى ونمر في السلك تياراً كهربائياً شديداً (10 أمبير تقريباً) نرج الورقة رجات خفيفة فنشاهد أن برادة الحديد تنتظم وفق



الشكل (15)

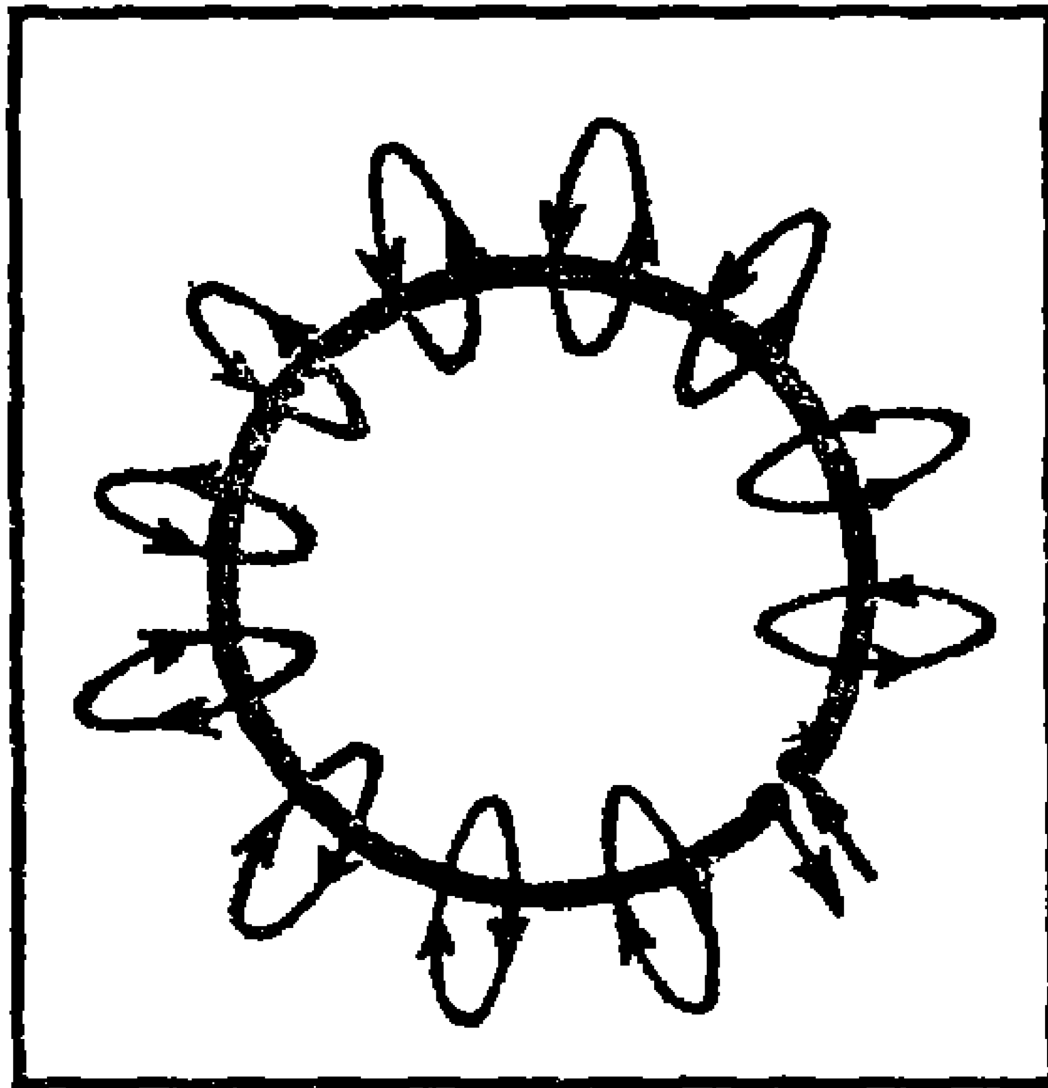
خطوط القوى المغناطيسية وترسم طيفاً مغناطيسياً. وهي في هذه الحالة مجموعتان من الخطوط مقفلة شكلها دائري تقريباً بجوار السلك عند النقطتين د، ل وهي تنحني في المناطق البعيدة نسبياً أما في مركز التيار الدائري فيتحول خط القوة إلى مستقيم ينطبق على محور التيار الدائري. ويمكننا أن نزيد من شدة المجال بأن نستبدل بالسلك الدائري

ملفاً يحوي عدداً من الحلقات المتراصة (الشكل 16) ونعين عملياً اتجاه خطوط القوة المغناطيسية للتيار الدائري كما ورد في حالة تيار مستقيم أو بوساطة بوصلة نضعها في مختلف نقاط سطح الورق



الشكل 16

المقوى، وأما نظرياً فنعين اتجاه خطوط القوة بوساطة إحدى القواعد التي ذكرناها سابقاً. ويعدّ السلك الدائري مكوناً من قطع صغيرة مستقيمة فيكون مجالها كالمجال المغناطيسي لتيار مار في سلك مستقيم (الشكل 17) إلا أن تنافر خطوط القوى في الأجزاء المختلفة من الدارة يغير من شكلها. فلا يقع مركزها على السلك ولا تكون تامة الاستدارة، ويتعيين اتجاه خطوط القوة في هذا المجال، نجدها تخرج من أحد وجهي اللفة الدائرية وتدور حول السلك ثم تدخل في وجه اللفة الآخر، كما لو كان المجال، مجال مغناطيس رقيق (صفيحة مغناطيسية) أحد

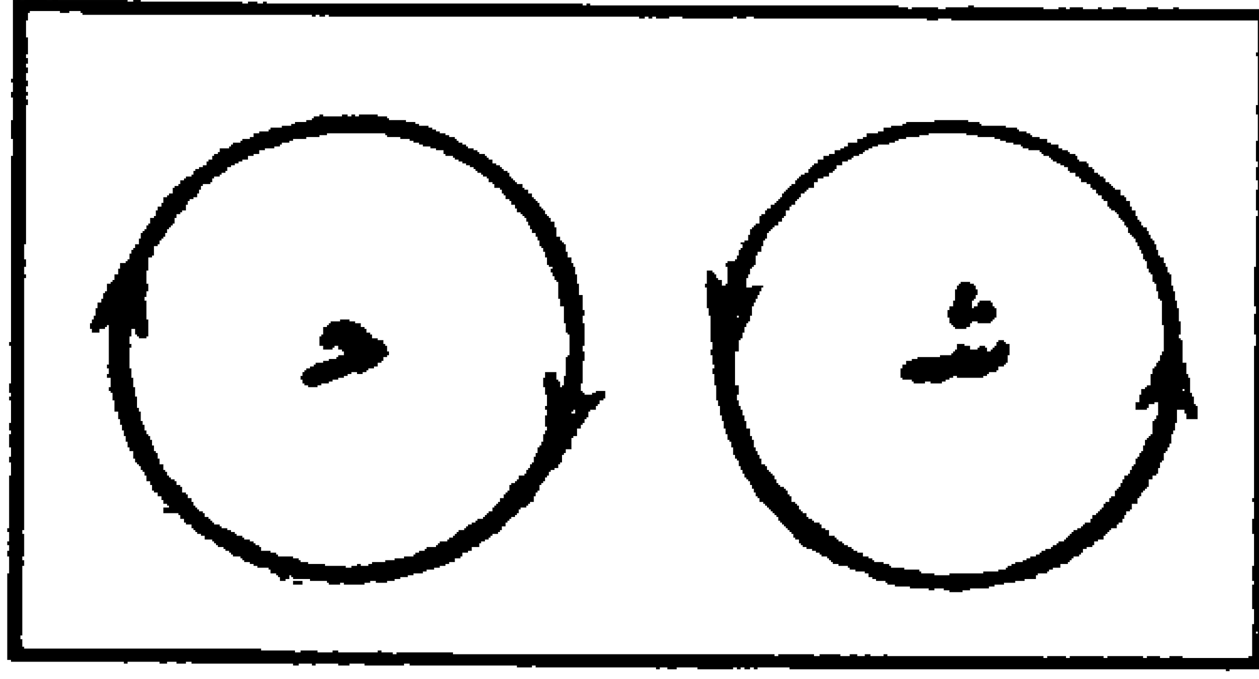


الشكل (17)

وجهيه قطب شمالي والآخر قطب جنوبي، ويمكن تعيين هذين القطبين الشمالي والجنوبي للفة الدائرية بقاعدة عقارب الساعة.وكيفية ذلك أن ننظر إلى احد وجهي اللفة فإن كان التيار يمر فيها بالنسبة لنا في اتجاه عقارب الساعة كان الوجه المقابل لنا قطباً جنوبياً (الشكل 18) وإن كان التيار يمر في عكس اتجاه عقارب الساعة كان الوجه قطباً شمالياً. وقد أثبتت القياسات أن شدة التحريض في مركز الملف تتناسب:

1. طرداً مع ن (عدد الحلقات المتراصة).
2. طرداً مع ش (شدة التيار في الملف).
3. عكساً مع ر (نصف قطر الحلقة) أي

أن: $ح = ثا \frac{ن \times ش}{ر}$



الشكل (18)

وفي الجملة الكهربائية العملية تقدر (ح) بالتسلا و (ش) بالامبير و (ر) بالمتر

فتكون: $ثا = \frac{2\pi}{10^7}$ وتصبح علاقة التحريض:

$$ح \text{ تسلا} = \frac{2\pi}{10^7} \times \frac{ن.ش}{ر} \quad \frac{\text{آمبير}}{\text{متر}}$$

والخلاصة: يولد التيار المار في إطار مستدير عدد لفاته ن ونصف قطره ر مجالاً مغناطيسياً، تتعين عناصر شعاع التحريض في مركزه كما يلي:

مبدؤه: مركز الإطار المستدير.

منحاه: محور الإطار المستدير أي العمود المقام من مركز الإطار المستدير على مستويه.

جهته: تتعين بإحدى القواعد التي عينت بها جهة خطوط القوة.

شدته: $ح = \frac{4\pi}{10^7} \times \frac{ن ش}{ل}$

تطبيق عددي:

نصنع من سلك طوله 10 أمتار ملفاً دائرياً يحوي 20 حلقة دائرية نصف قطرها واحد. احسب التحريض المغناطيسي في مركز الملف عندما يمر فيه تيار شدته 8 أمبير.

طول كل حلقة $= \frac{10}{20} = 0.5$ م ونصف قطرها:

ر = $\frac{0.5}{\pi 2} = \frac{1}{\pi 4}$ م

فالبتعويض في العلاقة السابقة نحصل على:

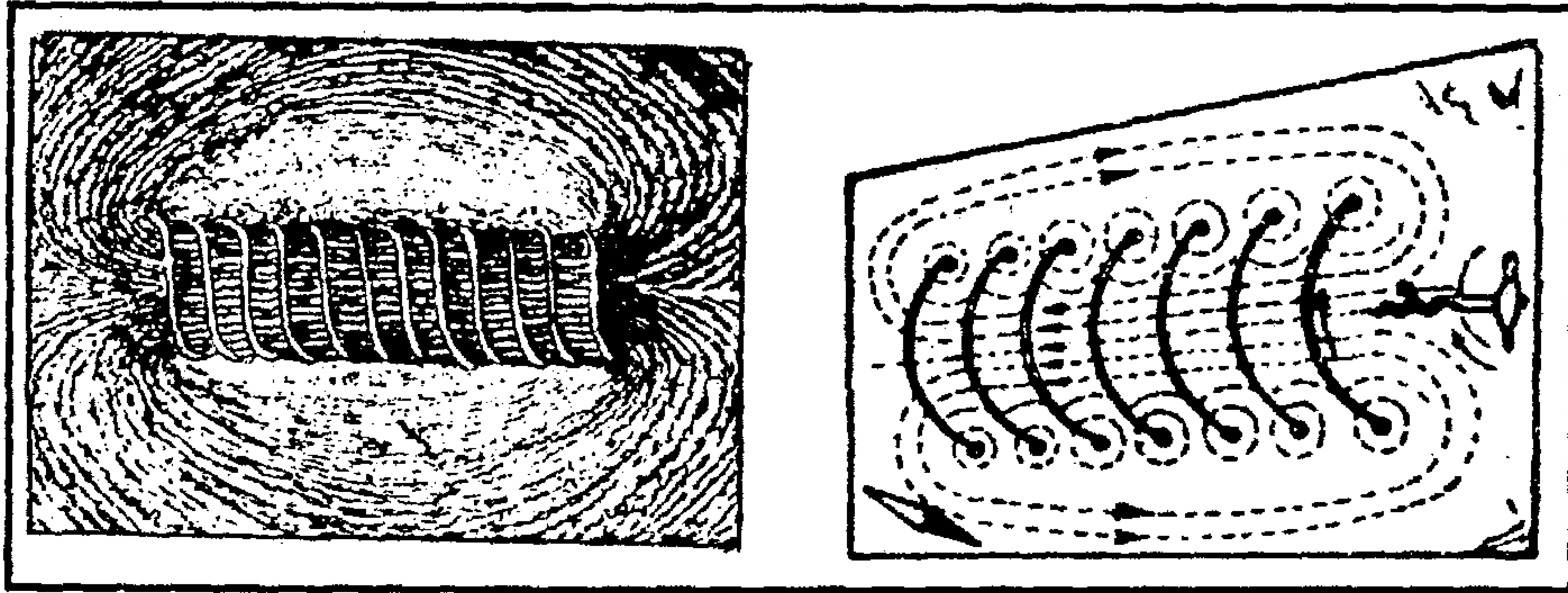
ح = $\frac{\pi 4 \times 8 \times 20 \times \pi 2}{710} = 13.6 \times 10^{-7}$ تسلا

المجال المغناطيسي لتيار كهربائي يمر في سلك حلزوني "وشيعة":

نلف سلكاً نحاسياً معزولاً لفاً حلزونياً؛ بحيث تتعامد مستويات لفاته مع مستوى صفيحة أفقية من الورق المقوى وينطبق محور الوشيعة الحاصلة على هذا المستوى.

فتخترق كل لفة الصفيحة في نقطتين، نمر تياراً كهربائياً شديداً في السلك الحلزوني ونذر برادة الحديد على لوح المقوى، ونرج الورقة رجات خفيفة فنشاهد أن برادة الحديد تنتظم وفق خطوط القوى المغناطيسية وترسم طيفاً مغناطيسياً (الشكل 19) نعين اتجاه خطوط القوى فيه بوساطة إبرة مغناطيسية أو بإحدى القواعد التي سبق ذكرها (قاعدة أمبير أو مكسويل).

نلاحظ أن خطوط القوة هي منحنيات مغلقة تتباعد خارج الوشيعة، وتتراص داخلها في الجزء المركزي منها بعيداً عن الجوانب والأطراف فتكوّن مستقيمات متوازية موازية لمحور الوشيعة أي أن التحريض المغناطيسي داخل الوشيعة منتظم.



الشكل (19)

ويكون لكل لفة من لفات السلك الحلزوني قطبان مختلفان، وتتجه الأقطاب المتشابهة جميعاً إلى جهة واحدة، فيتقابل القطب الشمالي من إحدى اللفات مع القطب

الجنوبي للفة التي تليها فيعدل بعضها بعضاً، ويكوّن القطب الشمالي للفة أحد الطرفين القطب الشمالي للوشيعة، كما يكوّن القطب الجنوبي للفة الطرف الآخر القطب الجنوبي للوشيعة. فالتيار الحلزوني يكافئ قضيباً مغناطيسياً. وإذا وضعت نواة من الحديد اللين داخل الوشيعة تمغنطت وانطبق قطباها على قطبي الوشيعة.

حساب التحريض المغناطيسي داخل الوشيعة:

دلت القياسات على أن هذا التحريض يتناسب:

1. طرداً مع عدد اللفات في كل متر من طول الوشيعة، ولحصل على هذا العدد بقسمة عدد لفات الوشيعة على طولها ل أي: $\frac{ن}{ل}$.
2. طرداً مع شدة التيار ش المار في السلك الحلزوني. ونعبر عن ذلك بالدستور.

$$ح = ثا \times \frac{ن}{ل} \times ش$$

وفي الجملة الكهربائية العملية تقدر ح بالتسلا و ش بالأمبير و ل بالمتر. فتكون: ثا= $\frac{4\pi}{10^7}$، وتصبح علاقة التحريض:

$$ح = \frac{4\pi}{10^7} \frac{ن}{ل} ش$$

وإذا فرض ن1 = $\frac{ن}{ل}$ أي ن عدد الحلقات في كل متر من طول الوشيعة، تصبح علاقة التحريض:

$$ح = \frac{4\pi}{10^7} . ن_1 . ش$$

والخلاصة: يولد التيار المار في وشيعة، عدد لفاتها ن وطولها ل، مجالاً مغناطيسياً تتعين عناصر شعاع تحريضه داخل الوشيعة وفي الجزء المركزي منها كما يلي:

مبدؤه: النقطة المعتبرة البعيدة عن الجوانب والأطراف.

منحاه: يوازي محور الوشيعة.

جهته: تعين بإحدى القواعد التي عينت بها جهة خطوط القوة.

شدته: $ح = \frac{4\pi}{10^{7}} \times \frac{ن}{ل}$ ش

تطبيق عددي:

طول وشيعة 40 سم وتحوي 800 حلقة، ما شدة التيار الذي يولد بمركزها تحريضاً مساوياً 2 × 10 – 4 تسلا.

تعطي العلاقة: $ح = \frac{4\pi}{10^{7}} \times \frac{هـ س}{ل}$ القيمة $ش = \frac{10^{7} \times ل \times ح}{4\pi ن}$

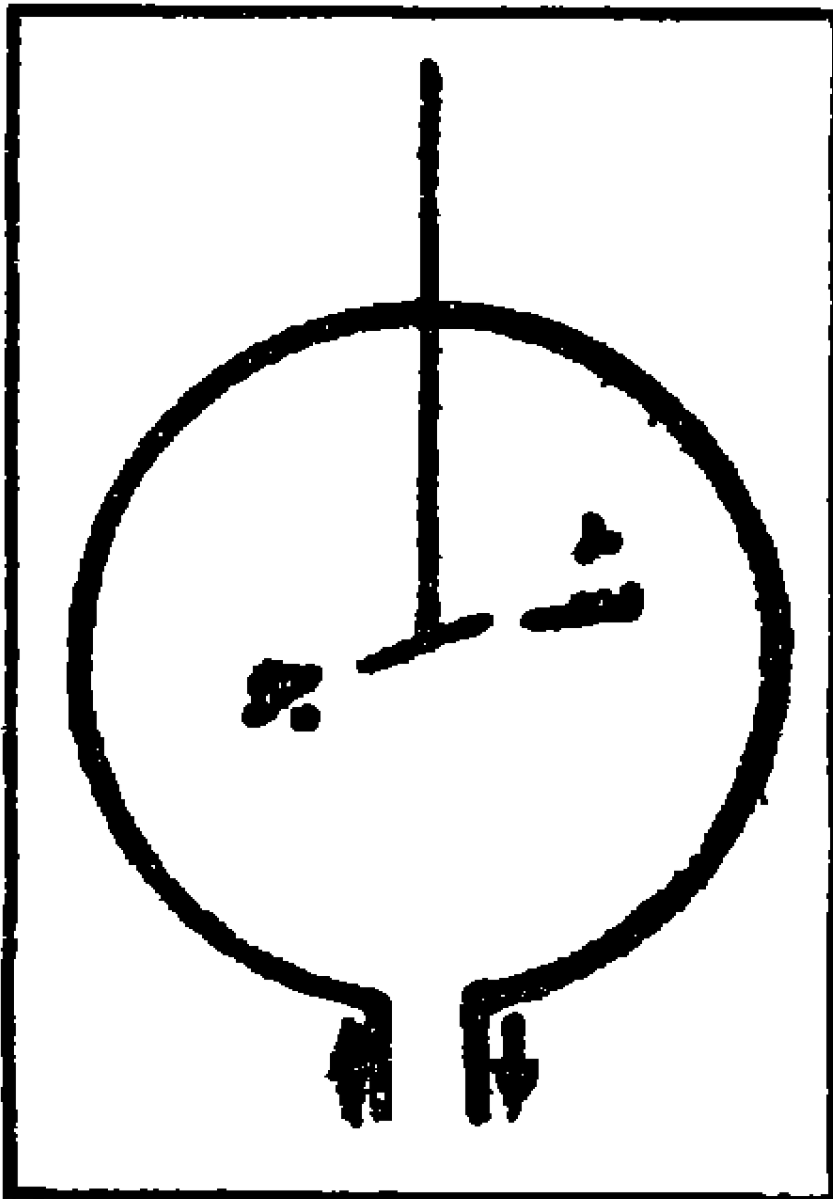
ولكن ح = 2 × 10 – 4 تسلا، ل = 0.4 م، ن = 800 حلقة.

إذا $ش = \frac{10^{7} \times 0.4 \times 2 \times 10^{-4}}{4\pi \times 800} = \frac{1}{4\pi}$

أو ش = 0.796 امبير.

المقياس الغلفاني ذو المغناطيس المتحرك:

المبدأ: إذا علقنا إبرة مغناطيسية بخيط من الحرير، وجعلناها في مركز تيار دائري (الشكل 20) ينطبق مستويه على مستوى الزوال المغناطيسي، أثر التحريض المغناطيسي الذي يولده هذا التيار في الإبرة فتنحرف عن وضع اتزانها، ويتناسب انحرافها مع شدة التحريض المغناطيسي أي مع شدة التيار الكهربائي المار في السلك الدائري، فمن قياس الانحراف نستطيع معرفة شدة التيار.

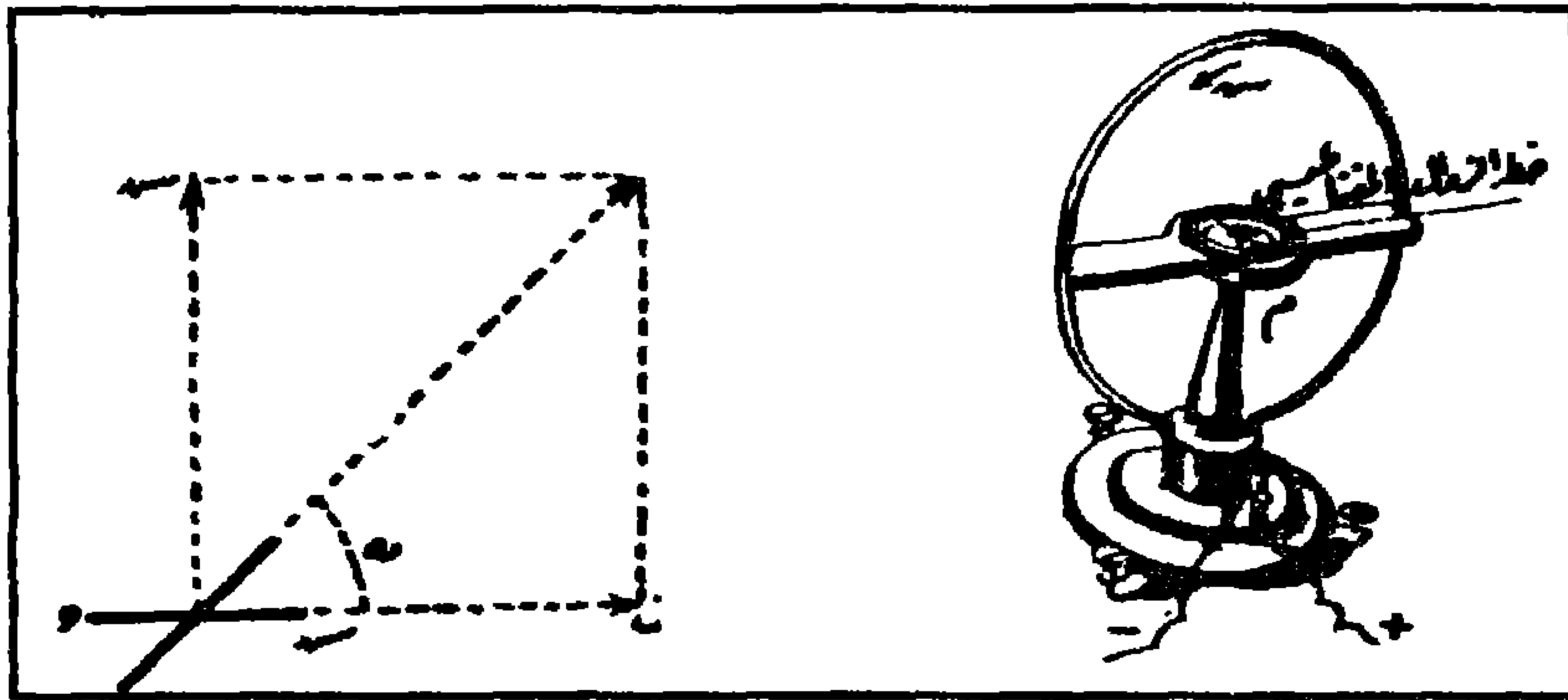


الشكل (20)

وصف المقياس:

يتألف هذا المقياس من ملف دائري وضعت في مركزه إبرة مغناطيسية صغيرة متحركة فوق محور شاقولي (الشكل 21) أو محمولة بخيط من الحرير.

عندما يمر التيار الكهربائي في الملف الذي ينطبق مستواه على مستوى الزوال المغناطيسي، يؤثر التحريض المغناطيسي المتولد في قطبي الإبرة بمزدوجة تحرفها عن وضع اتزانها الأصلي (شمال – جنوب) ويزداد الانحراف بازدياد شدة التحريض فالإبرة كانت في البدء تحت تأثير المركبة الأفقية للتحريض الأرضي ف التي كانت تؤثر في الإبرة، فأصبحت بعد مرور التيار تحت تأثير المركبة الأفقية وشعاع التحريض ح الناتج عن مرور التيار حيث:



الشكل (22) الشكل (21)

$ح = \frac{2\pi\ ن\ ش}{10^7\ ر}$ فتنحرف الإبرة بزاوية به (الشكل 22)

تعطي بالعلاقة: $ظل\ به = \frac{ح}{ف} = \frac{2\pi\ ن\ ش}{10^7\ ر\ ف}$

وبفرض (به) صغيرة:

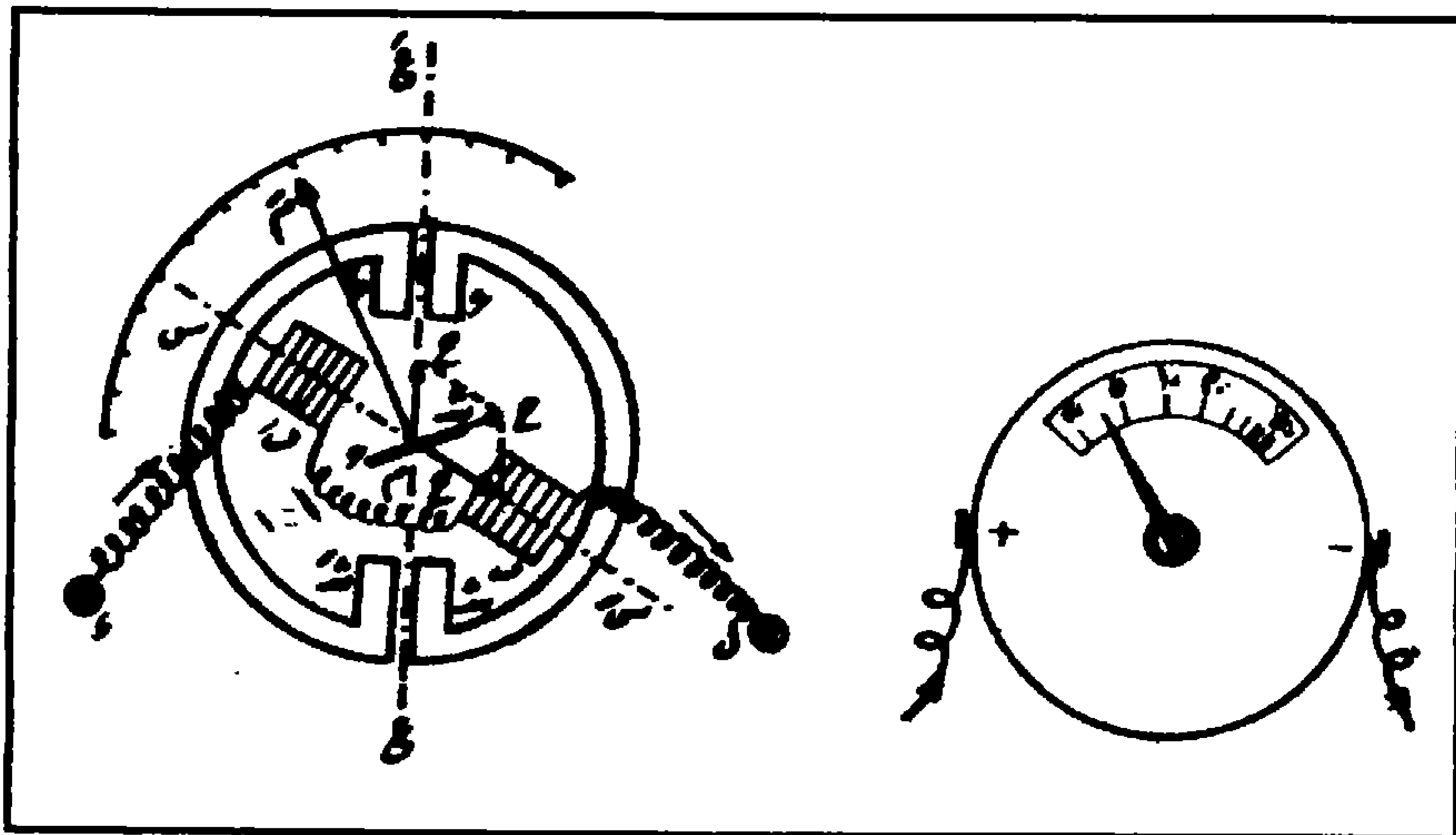
تمكن كتابة: به $\frac{2\pi \text{ ن ش}}{10^7 \text{ ر ف}}$ وتدعى القيمة $\frac{2\pi \text{ ن}}{10^7 \text{ ر ف}}$ بثابت المقياس من أجل مكان معين ويرمز لها بـ (ثا) وتصبح علاقة الانحراف به = ثا × ش فإذا عرفنا (به) استطعنا أن نعرف ش.

هذا وتزداد حساسية الجهاز كلما عظم ثا ويتم ذلك: 1. بزيادة عدد اللفات ن 2. بانقاص نصف قطر الملف (ر) 3. بانقاص تأثير المركبة الأفقية ف.

المقاييس الغلفانية الصناعية:

لا يستعمل المقياس السابق إلا في المخابر، وأما في الصناعة فتستعمل مقاييس الأمبير والفولط العادية ومبدؤها هو المبدأ نفسه وإنما تمتاز بمتانتها وسهولة استعمالها وخفة وزنها.

ويستبدل في هذا الجهاز خيط التعليق بمحور رأسي يسمح للإبرة بالحركة في مستوى أفقي، ويثبت بالإبرة سهم متين م مَ، يتحرك أمام قوس مرسومة في قاعدة علبة نحاسية أسطوانية، ويشير السهم إلى شدة التيار (الشكل 23 – أ).



الشكل (23)

وأما التحريض المؤثر في الإبرة فهو التحريض المتولد من مغناطيسين دائمين تهمل أمامهما المركبة الأفقية للتحريض الأرضي، فتتجه الإبرة في الاتجاه ع عَ ويمر التيار الكهربائي المراد معرفة شدته في وشيعتين متصلتين تحصران بينهما الإبرة المغناطيسية كما هو ظاهر في الشكل (23 – ب) فتؤثران في الإبرة بتحريض مغناطيسي يتجه وفق المحور س سَ، بينما يحاول المغناطيسان جعل الإبرة حسب الاتجاه ع عَ فتتجه الإبرة وفق محصلة المجالين، وإذا كان سلك الوشيعتين غليظاً وقصيراً (مقاومته صغيرة) كان المقياس صالحاً لقياس الشدة ويربط في الدارة عندئذ على التسلسل ويدعى مقياس الأمبير، أما إذا كان السلك رفيعاً وطويلاً (مقاومته كبيرة) كان هذا المقياس صالحاً لقياس فرق الكمون ويربط في الدارة على التفرع ويدعى عندئذ مقياس الفولط.

تمارين ومسائل

1. نلف سلكاً طوله 200 م حول وشيعة طولها 50 سم وقطرها 10 سم، ونرسل في هذه الوشيعة تياراً شدته 2 أمبير، احسب التحريض المغناطيسي في مركز الوشيعة.

الجواب: 32×10^{-4} تسلا

2. تبلغ قيمة التحريض المغناطيسي في مركز وشيعة 25×10^{-3} تسلا عندما يمر فيها تيار شدته 4 أمبير فإذا جرى اللف بسلك قطره 1 مم (بما فيه ثخنه العازل) وإذا كانت الحلقات مماساً بعضها لبعض، احسب عدد الطبقات. يعتبر $4\pi = 12.5$.

الجواب: 5 طبقات

3. يمر تيار مستقيم شدته 20 أمبير في سلك قطره 2 مم. احسب التحريض في نقطة تقع على السلك ثم في نقطة تبعد 2 سم عن محوره.

الأجوبة: 4×10^{-3} تسلا، 2×10^{-4} تسلا

4. طول وشيعة 20 سم وتتألف من 200 لفة، نضع في مركزها إبرة ممغنطة حرة الحركة حول محور شاقولي ونجعل محور الوشيعة يتعامد مع مستوى الزوال المغناطيسي. فإذا أرسل في الوشيعة تيار شدته 25 ميلي أمبير انحرفت الإبرة بزاوية قدرها °60. احسب المركبة الأفقية للتحريض الأرضي.

الجواب: 1.8×10^{-5} تسلا

5. نضع إبرة ممغنطة في مركز وشيعة تتألف من 8000 لفة في كل متر من طولها فتتعامد الإبرة مع محور الوشيعة. احسب الزاوية التي تدورها الإبرة إذا أرسل في

الوشيعة تيار شدته 10^{-4} أمبير إذا علمت أن المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

الجواب: به = 3°

6. أمر تيار شدته 10 أمبير في وشيعة طولها 40 سم، فإذا كنا نود الحصول على تحريض مغناطيسي شدته في داخل الوشيعة 0.02 تسلا فكم يجب أن يكون عدد لفاتها.

الجواب: 637 لفة

7. وضعت إبرة ممغنطة أفقياً في مركز وشيعة موضوعة أفقياً ويتعامد محورها مع خط الزوال المغناطيسي. فإذا كان طول الوشيعة 25سم وتتألف من 500 لفة، احسب شدة التيار الواجب إمراره في الوشيعة حتى تنحرف الإبرة في داخلها زاوية قدرها 45°. نفرض المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

الجواب: 8 ميلي أمبير

8. هيئ المقياس الغلفاني ذو المغناطيس المتحرك في وضعه المألوف ثم أمر به تيار فانحرف المؤشر زاوية ظلها 0.4 ثم أدير المقياس 90° حول محور رأسي يمر بمركزه ثم عكس التيار. وازن بين شدتي التحريض الكلي عند مركز اللف بعد إدارته قبل وبعد عكس التيار.

الجواب: $\frac{ح_1}{ح_2} = \frac{3}{7}$

9. وضع ملف تيار دائري بحيث كان مستواه عمودياً على مستوى الزوال المغناطيسي وأمر به تيار ثم أدير الملف حول قطره الرأسي 180° فصار التحريض الكلي عند مركزه 32 ما كان عليه وفي اتجاه مضاد. أوجد شدة التيار المار إذا علم أن عدد حلقات الملف 28 حلقة ونصف قطره 5.5 سم والمركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

الجواب: 66.5 ميلي أمبير

فعل التحريض المغناطيسي في التيار الكهربائي

المقياس الغلفاني ذو الإطار المتحرك

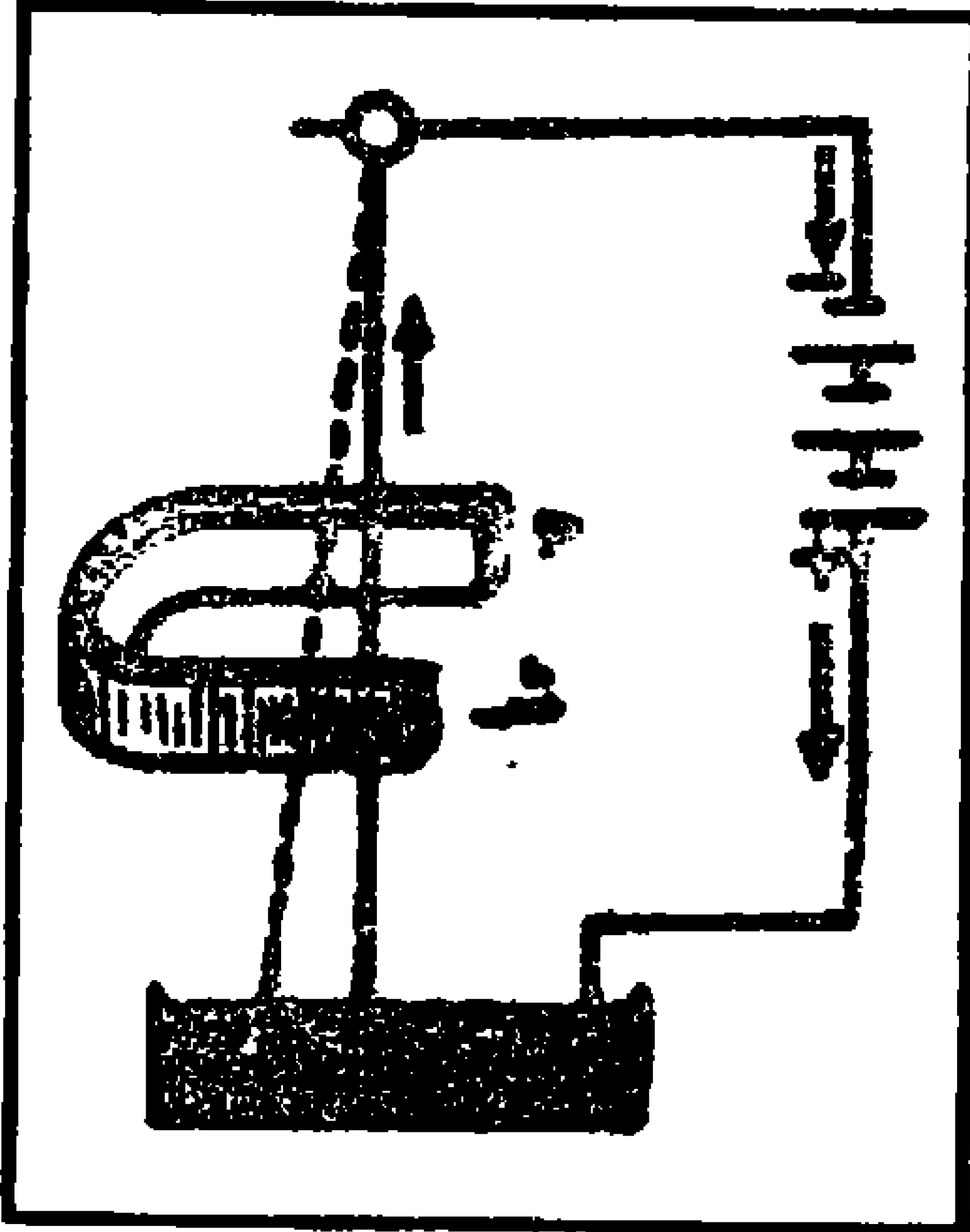
فعل التحريض المغناطيسي في التيار الكهربائي:

تمهيد:

بما أن التيار الكهربائي يولد تحريضاً مغناطيسياً يؤثر في الإبرة المغناطيسية الواقعة بجواره ويحرفها، فوفقاً لمبدأ الفعل ورد الفعل يؤثر التحريض المغناطيسي في التيار الكهربائي ويحرك الناقل. وقد رأينا أن التيار الدائري يشبه صفيحة مغناطيسية وأن التيار الحلزوني يشبه قضيباً مغناطيسياً. ولما كان التحريض المغناطيسي يؤثر في المغناطيس (صفيحة مغناطيسية أو قضيباً مغناطيسياً) فهو يؤثر كذلك في كل من التيارين الدائري والحلزوني، وبصورة عامة يؤثر في كل دارة كهربائية. كل هذا يدعونا إلى القول أن للتحريض المغناطيسي فعلاً في التيار الكهربائي، ولنبحث إذاً في هذا الفعل.

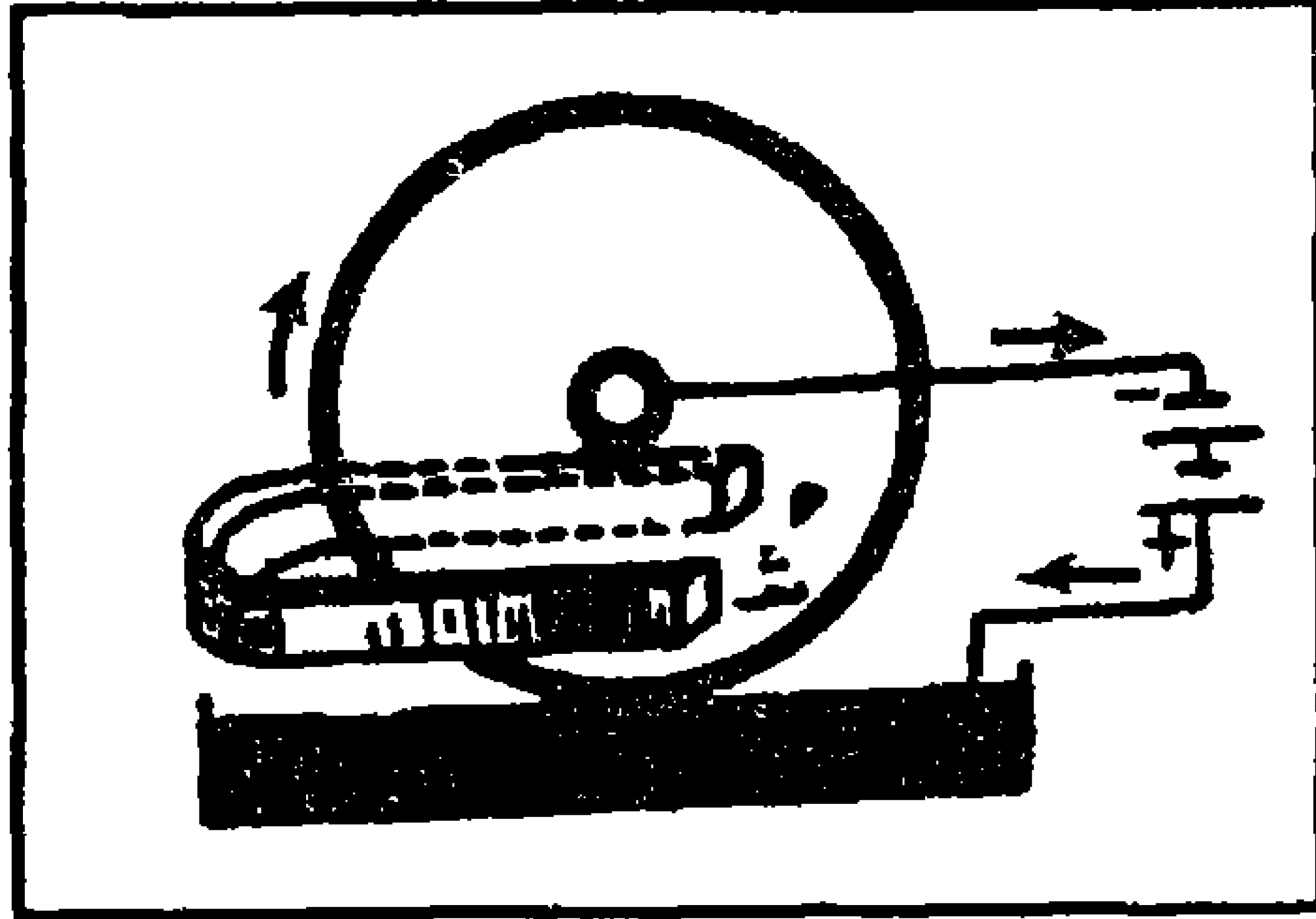
تجارب:

1. نأخذ سلكاً من النحاس ونعلق نهايته العليا بخطاف وندع نهايته السفلى تنغمس في حوض يحوي زئبقاً. فإذا أمررنا تياراً في السلك لا نلاحظ شيئاً ولكن إذا جعلنا السلك بين فرعي مغناطيس نضوي أفقي (الشكل 24) نجد أن السلك الحر الحركة ينزاح عن وضعه لدى مرور التيار وتتغير جهة الإزاحة بتغير جهة التيار أو بمبادلة مواضع أقطاب المغناطيس.



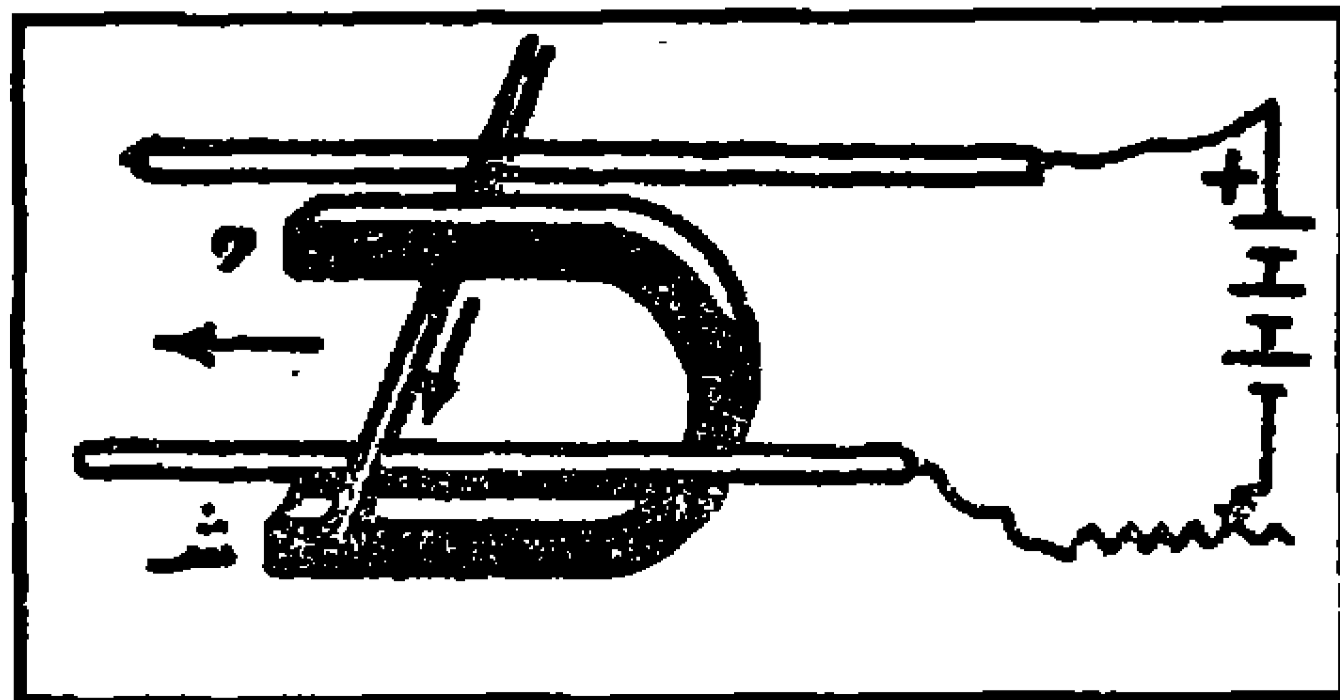
الشكل (25)

2. **تجربة دولاب بارلو:** يدور دولاب نحاسي في مستوٍ شاقولي حول محور أفقي، ويقع نصف الدولاب السفلي ضمن تحريض مغناطيسي متولد عن مغناطيس نضوي شـ ـحـ موضوع بشكل أفقي (الشكل 25) ويتصل محور الدولاب بأحد قطبي المولد بالمستودع الزئبقي الذي يمس أسفل الدولاب فيدور القرص باتجاه السهم بفعل القوة التي يؤثر بها التحريض المغناطيسي على التيار، وتتغير جهة الدوران أما بتغير جهة التيار أو بتبديل وضع القطبين المغناطيسيين.



الشكل (26)

3. **تجربة السكتين:** نضع في مستوى أفقي سلكين نحاسيين متوازيين يتصلان بقطبي مولد كهربائي، ونغلق الدارة بقضيب أسطواني من النحاس، يرتكز على السكتين بحيث يكون عمودياً عليهما، نمر في هذه الدارة تياراً كهربائياً فلا نلاحظ أية حركة، أما إذا أحطنا القضيب النحاسي بمغناطيس نضوي قوي بحيث يتعامد مجال تحريضه مع القضيب، نرى القضيب يتدحرج على السكتين كما هو مبين في الشكل (26). وإذا غيرنا جهة التيار أو غيرنا وضع قطبي المغناطيس تغيرت جهة التدحرج.



شكل (27)

عناصر القوة الكهرطيسية – قانون لا بلاس:

نستنتج من هذه التجارب أن المغناطيس يؤثر في التيار بقوة تدعى القوة الكهرطيسية يظهر تأثيرها في الجزء الحر الحركة من الدارة.

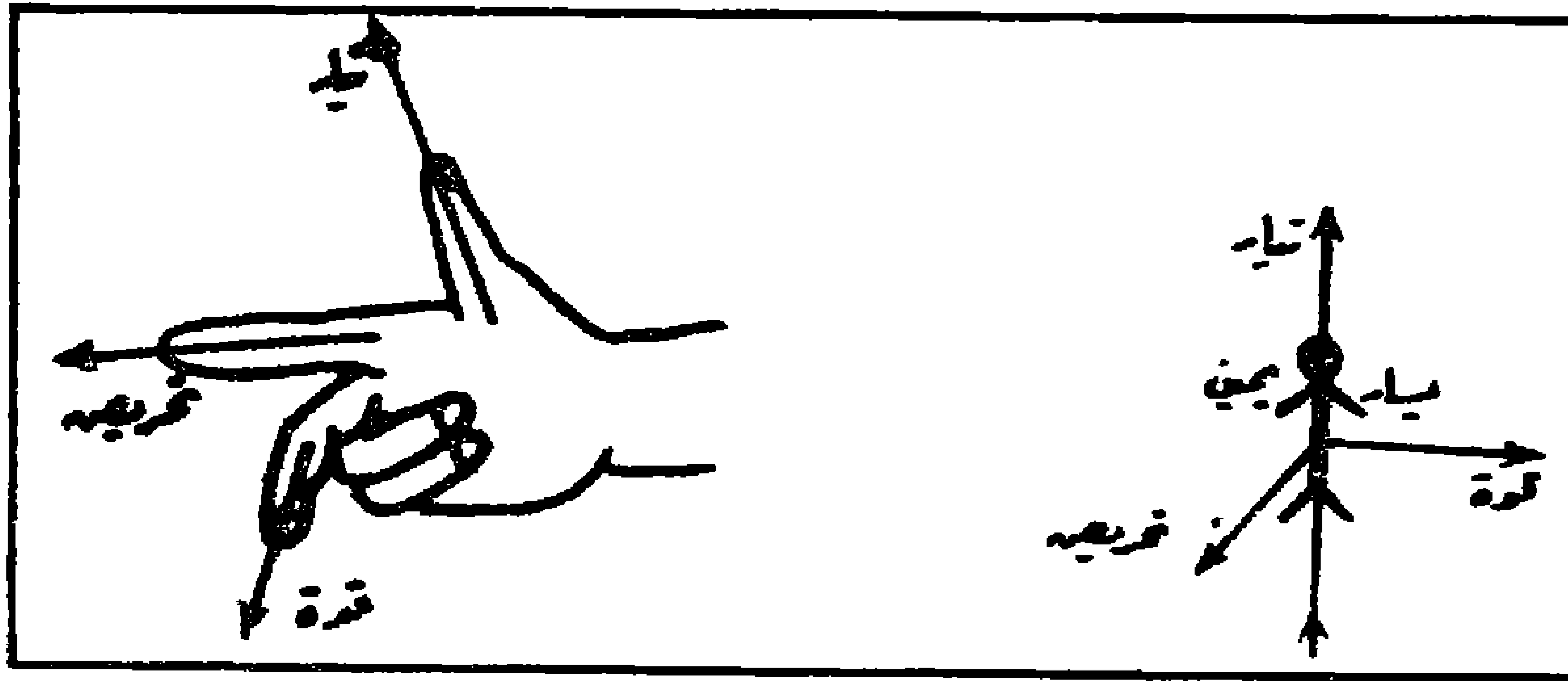
فإذا اعتبرنا جزءاً من ناقل مستقيم طوله "ل" يمر فيه تيار شدته ش يقع في مجال تحريضي منتظم ح، أثرت في هذا الجزء من الناقل قوة كهرطيسية عناصرها هي التالية:

أ. نقطة تأثيرها: هي منتصف الجزء من الناقل الموجود ضمن المجال.

ب. منحاها: عمودي على المستوى المعين بشعاع التحريض وجزء الناقل المستقيم.

ج. جهتها: تتعلق بكل من جهتي شعاع التحريض والتيار فتتغير بتغير جهة أحدهما، وتعين بعدة قواعد منها القاعدتان التاليتان.

1. **قاعدة إنسان أمبير:** إذا انطبق إنسان أمبير على جزء الناقل، بحيث يجتازه التيار من رجليه إلى رأسه، وهو ينظر في اتجاه التحريض المغناطيسي (الشكل 27) فإن القوة الكهرطيسية تتجه نحو يساره.



الشكل (28) الشكل (27)

12. **قاعدة الأصابع الثلاثة:** إذا جعلنا سبابة اليد اليمنى في اتجاه التحريض وإبهامها في جهة التيار، عينت لنا الأصبع الوسطى في هذه اليد بعد جعلها عمودية على الإبهام والسبابة، اتجاه القوة التي يؤثر بها المغناطيس في الجزء الحر الحركة من الدارة الشكل (28).

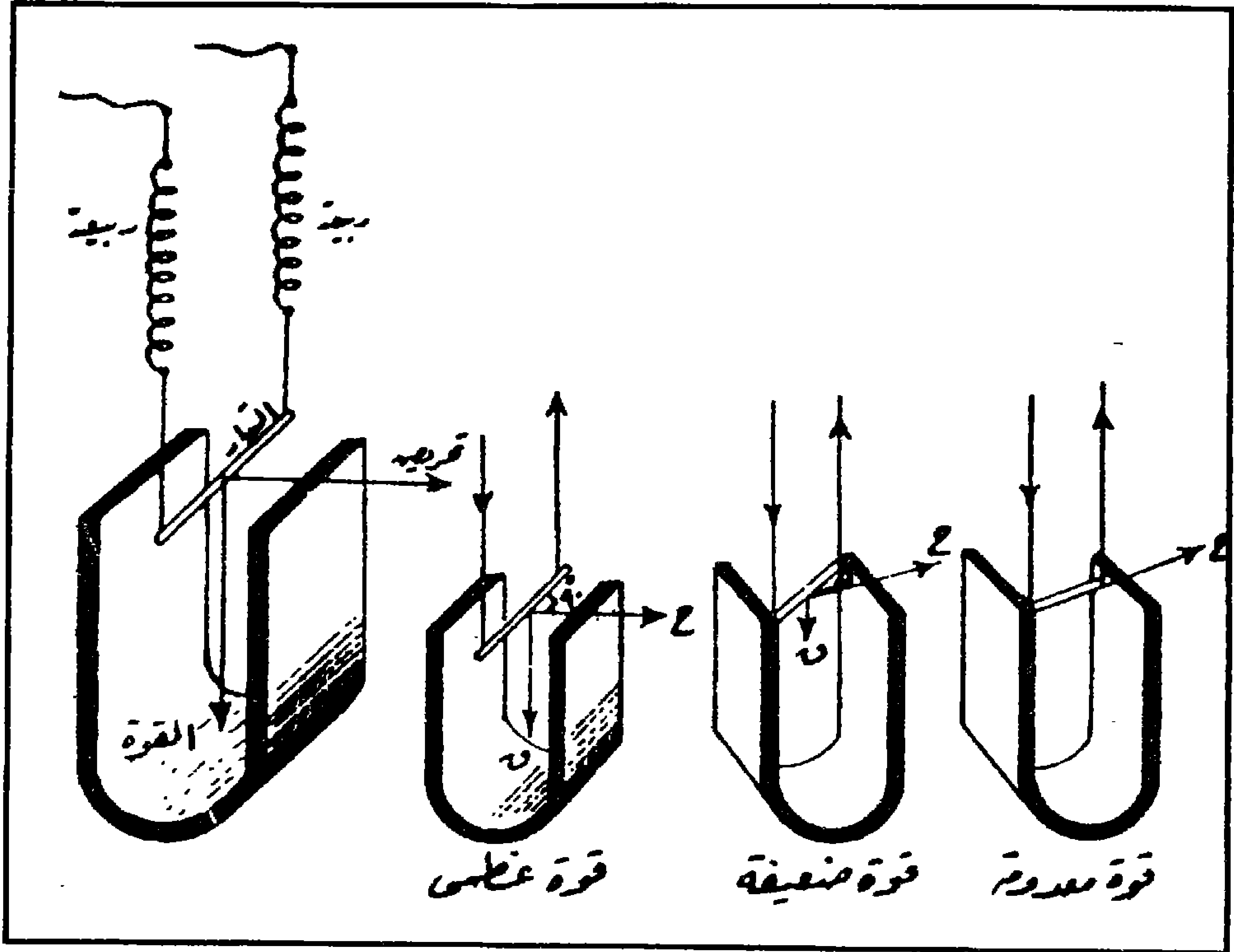
3. **شدتها: تدل الدراسة على أن شدة القوة الكهرطيسية تتناسب:**

1) طرداً مع شدة التيار.

2) طرداً مع شدة التحريض المغناطيسي ح.

3) طرداً مع طول جزء الناقل ل.

4) وتتغير قيمة هذه القوة مع الزاوية به الحادثة بين منحى التحريض ومنحى التيار (الشكل 29) وتتناسب مع جيب هذه الزاوية أي:



الشكل (29)

ق = ثا. ش. ل ح حب ه

ولكن في الجملة الكهربائية العملية نجد أن ثا = 1 إذاً:

ق = ش. ل . ح حب ه

نيوتن أمبير م تسلا

ويعرف هذا القانون بقانون لابلاس.

ملاحظة: في حالة دولاب بارلو يكون طول الناقل هو طول نصف قطر الدولاب.

تطبيق عددي: يصنع سلك نحاسي طوله 5 سم زاوية 30 درجة مع تحريض مغناطيسي شدته 5×10^{-2} تسلا. فإذا اجتاز السلك تيار شدته 8 أمبير احسب القوة التي تفعل في السلك.

تطبيق قانون لابلاس باستخدام الجملة الكهربائية العملية:

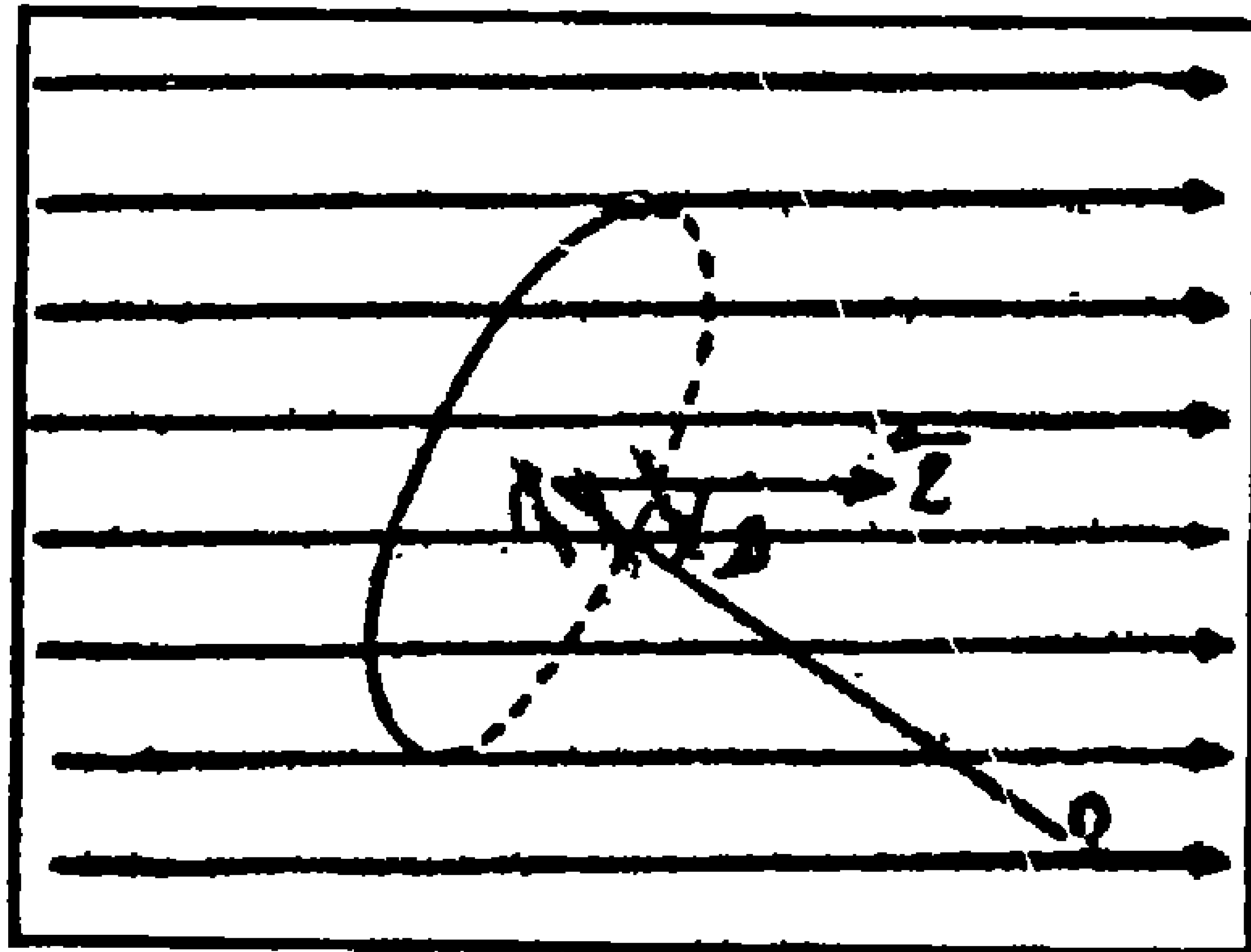
ش = 8 أمبير ، ح = 5×10^{-2} تسلا

ل = 0.05 م ، حب ه = $\frac{1}{2}$

فينتج: ق = $8 \times 0.05 \times 5 \times 10^{-1} \times \frac{1}{2} = 10^{-2}$ نيوتن

تدفق التحريض المغناطيسي المنتظم:

إذا وضعنا سطحاً مستوياً له محيط ما ضمن مجال مغناطيسي منتظم شعاع تحريضه ح (الشكل 30)، اخترقت خطوط القوة هذا السطح، ونقول إن تدفقاً مغناطيسياً يجتاز السطح، ويزداد هذا التدفق بزيادة عدد خطوط القوة التي تجتاز السطح وينقص بنقصانها، ويتعلق تدفق التحريض المغناطيسي (نق).



الشكل (30)

1. بشدة التحريض المغناطيسي "ح" ويتناسب معها طرداً.
2. بمساحة السطح "سط" الموضوع ضمن المجال ويتناسب معه طرداً.

3. بميل السطح على خطوط القوة ويعبر عنه بالزاوية "هـ" التي يصنعها الناظم على السطح م ن مع منحى شعاع التحريض، ويتناسب تدفق التحريض المغناطيسي طرداً مع "جب هـ".

أي: نق = ثا. ح. سط. جب هـ

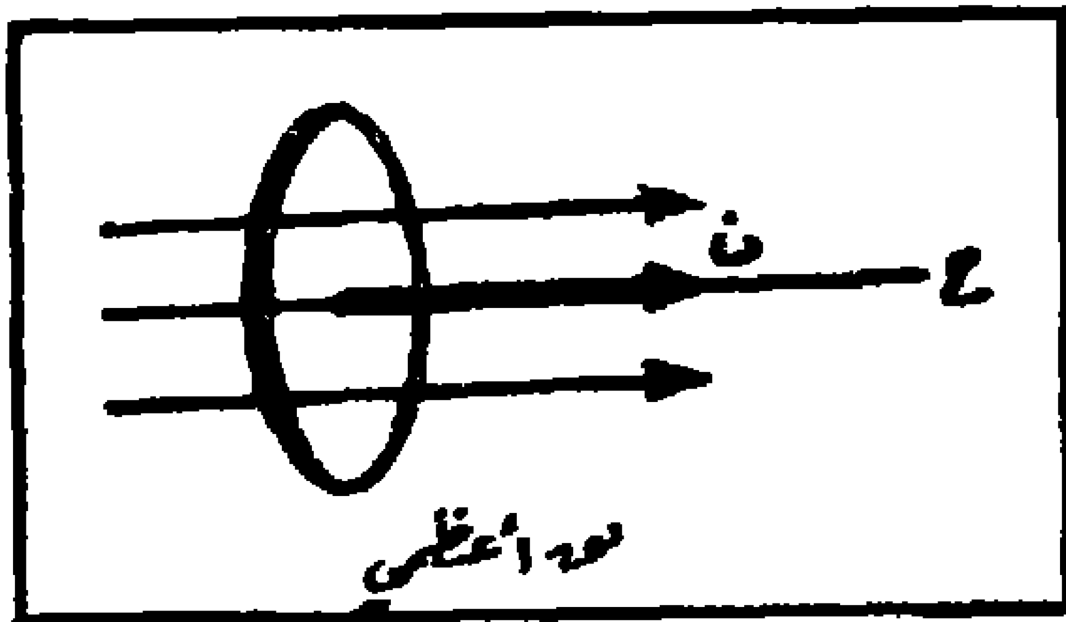
وفي الجملة الكهربائية العملية حيث تقدر نق بـ"الويبر Weber" وح بـ: تسلا وسط بالمتر المربع تكون ثا = 1 وينتج:

نق = ح . سط. جب هـ

ويبر تسلا م2

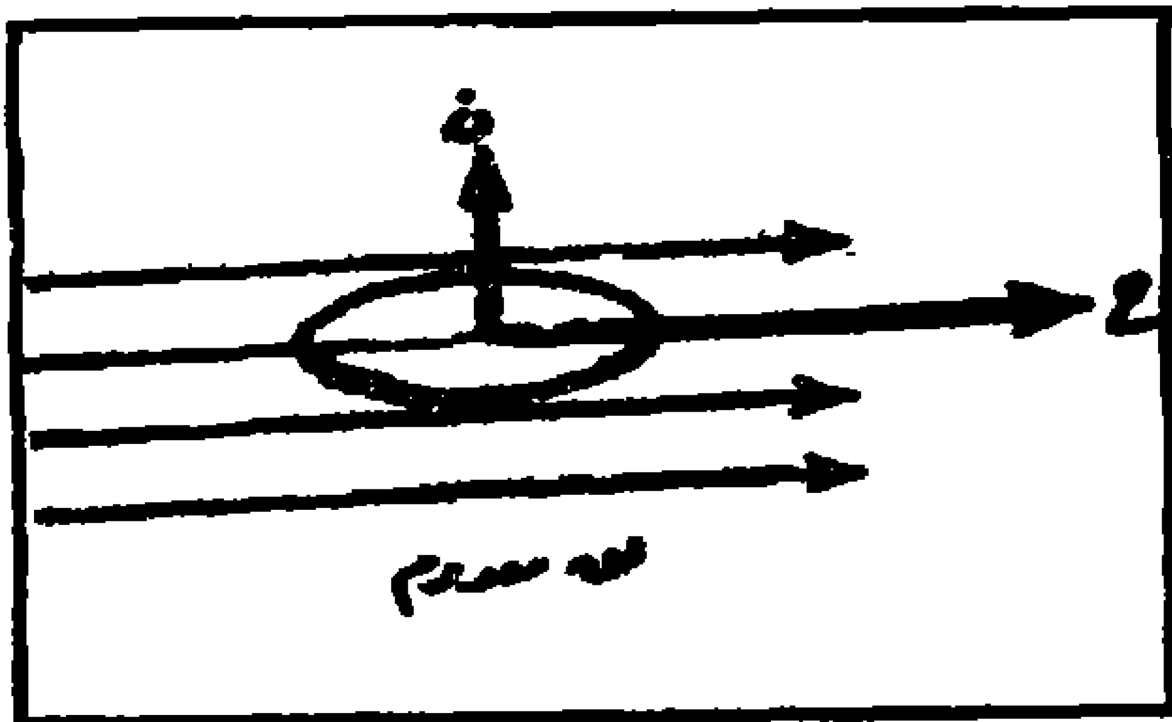
المناقشة:

1. إذا كان السطح عمودياً على منحى شعاع التحريض كانت هـ = 0 و جب هـ = 1 وكان التدفق أعظمياً (الشكل 31).



الشكل (31)

2. إذا كان السطح منطبقاً على منحى شعاع التحريض كانت هـ = 90 و جب هـ =0 وكان التدفق معدوماً (الشكل 32).



الشكل (32)

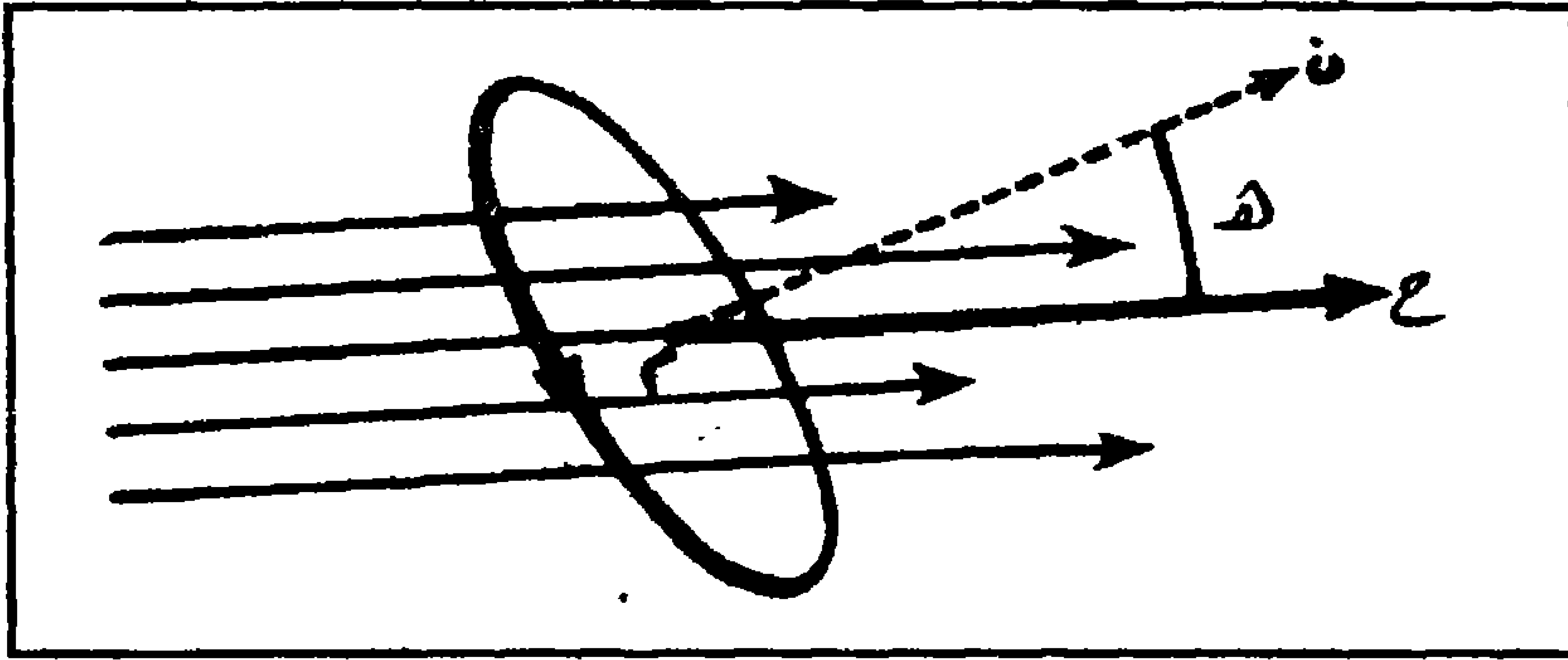
ولفهم التدفق نتصور أن لدينا حلقة موضوعة في مجرى مائي، فكمية الماء التي تجتاز الحلقة في واحدة الزمن هي التدفق، وتتعلق بسطح الحلقة وبشدة التيار المائي وبميل الحلقة على اتجاه التيار المائي. ويقال أن تدفق الماء أعظمي حين تكون الحلقة عمودية على مجرى الماء، وأن التدفق معدوم عندما تكون الحلقة موازية لمجرى الماء.

ملاحظة:

إن وحدة التدفق في الجملة السغثية هي الماكسويل (كل ويبر يعادل 10^8 ماكسويل).

تدفق التحريض المغناطيسي في دارة كهربائية:

تعتبر دارة مستوية موضوعة في مجال تحريضي منتظم (الشكل 33).



الشكل (33)

وتعتبر الجهة الموجبة على الناظم م ن هي جهة يسار إنسان أمبير الذي ينظر إلى داخل الدارة، وبتعبير آخر هي الجهة المعينة من الوجه الجنوبي إلى الوجه الشمالي للدارة. فيكون التدفق الذي يخترق الدارة.

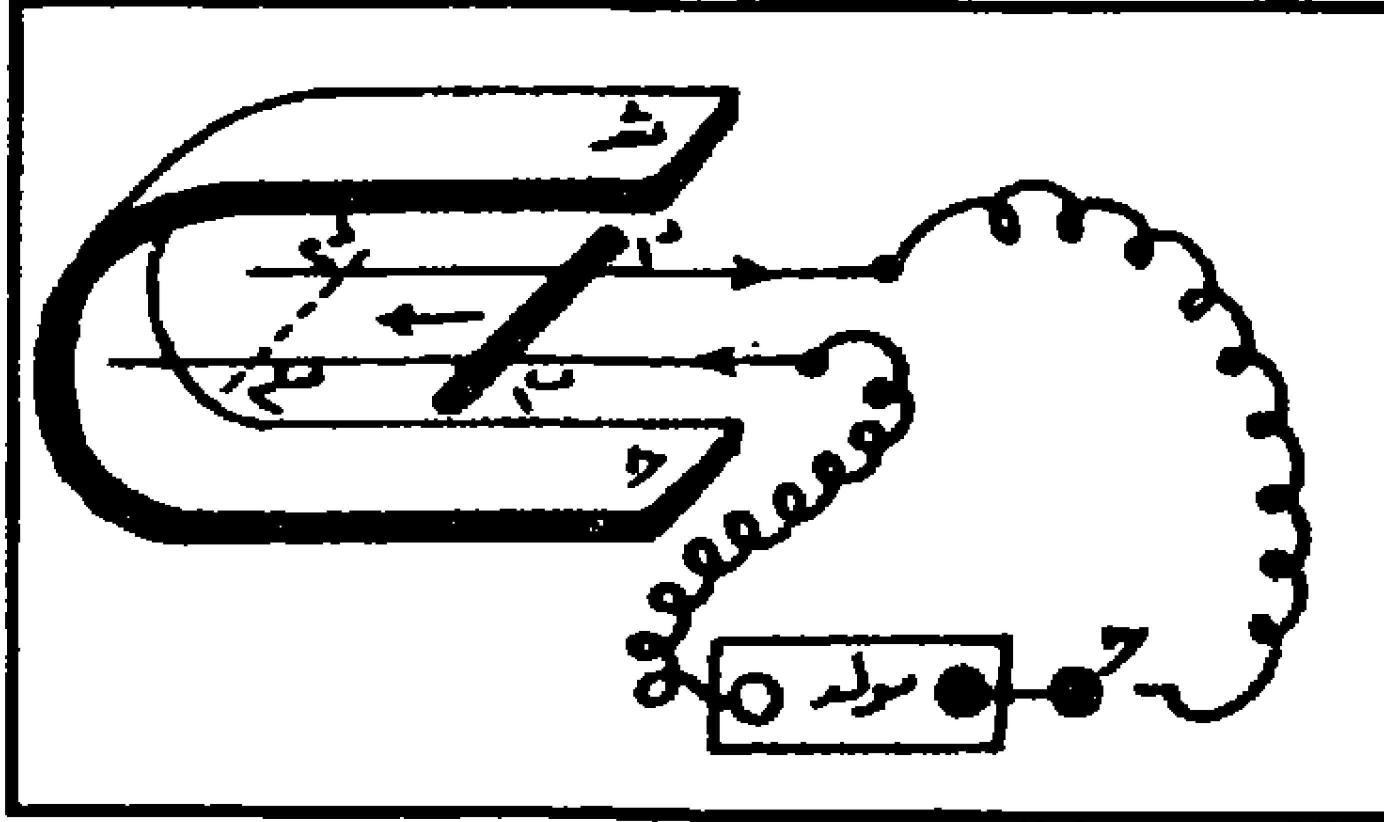
نق = ح. سط. تجب هـ

حيث هـ: هي الزاوية بين منحى الناظم وشعاع التحريض.

فإذا كانت هـ حادة يكون التدفق موجباً، وتدخل خطوط القوة من الوجه الجنوبي للدارة. أما إذا كانت هـ منفرجة فيكون التدفق سالباً، وعندئذ تدخل خطوط القوة من الوجه الشمالي للدارة.

عمل القوى الكهرطيسية:

نعتبر الحالة التي يكون فيها التحريض متعامداً مع التيار والانتقال ونفرض أن القوة ق تؤثر على القضيب النحاسي في تجربة السكتين فيتدحرج من الوضع ب$_1$ إلى الوضع ب$_2$ منتقلاً المسافة ب$_1$ ب$_2$ (الشكل 34) فعمل القوة ق:



الشكل (34)

عم = ق × ب$_1$ ب$_2$

ولكن: ق = ش × ب$_1$ د$_1$ × ح

فيصبح العمل: عم = ش × ح × ب$_1$ د$_1$ × ب$_1$ ب$_2$

إلا أن: ب$_1$ د$_1$ × ب$_1$ ب$_2$ = Δ سط السطح الذي يمسحه القضيب عند انتقاله من ب$_1$ إلى ب$_2$ فيكون العمل:

عم = ش . ح. Δ سط

جول أمبير تسلا م^2

نظرية مكسويل:

وجدنا أن عمل القوى الكهرطيسية:

عم = ش. ح. Δ سط

ولكن ح. Δ سط = Δ نق

إذاً عم = ش Δ نق

ونلاحظ في الشكل (34) أن التدفق المغناطيسي في الجزء من الدارة المحدود بالسكتين موجب، وأن عمل القوة ق موجب عندما يزداد هذا التدفق، فيمكننا أن نكتب العلاقة الجبرية التالية:

Δ نق = نق$_2$ − نق$_1$

نق$_1$: التدفق التحريضي الذي يخترق الدارة عندما يكون القضيب في ب$_1$ د$_1$.

نق$_2$: التدفق التحريضي الذي يخترق الدارة عندما يصل القضيب إلى ب$_2$ د$_2$.

فنستنتج نظرية مكسويل: إن قيمة عمل القوى الكهرطيسية عند انتقال دارة كهربائية في مجال تحريضي يساوي جداء شدة التيار في تزايد تدفق التحريض المغناطيسي الذي يخترق هذه الدارة.

عم = ش (نق$_2$ − نق$_1$)

جول أمبير ويبر

تطبيق عددي: وضعت حلقة دائرية نصف قطرها 5 سم ويجتازها تيار شدته 30 أمبير في مستوى الزوال المغناطيسي. فإذا أديرت لتصبح عمودية على هذا المستوى، احسب عمل القوى الكهرطيسية أثناء هذا الانتقال. تفرض المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا.

يحسب هذا العمل بالاستناد إلى نظرية مكسويل: عم = ش (نق$_1$ − نق$_2$)

أما نق فهو معدوم لأن ح في مستوى الدارة أي: نق1 = 0 فتكون القيمة المطلقة للتدفق الكلي:

نق$_2$ = سط. ح = $\pi (0.05)2 \times 2 \times 10^{-5} = 5\pi \times 10^{-8}$ ويبر.

1. نفرض نق$_2$ > 0 فيخترق التحريض الأرضي الوجه الجنوبي للحلقة ويكون للعمل:

عم = 30 × 5 π × 10^{-8} = 4.7 × 10^{-6} جول.

موجباً أي أن القوة الكهربائية تؤثر وحدها على الحلقة فتديرها لتجعل التدفق يخترق وجهها الجنوبي.

2. نق2 > 0 فالتدفق يخترق الحلقة عندئذ من الوجه الشمالي لأننا أدرنا الحلقة بعكس الجهة السابقة، فيكون العمل سالباً ويجب أن نبذل عملاً للتغلب على عمل القوى الكهرطيسية.

نتيجة نظرية مكسويل: قاعدة التدفق الأعظمي:

عندما يؤثر تحريض مغناطيسي في دارة كهربائية تستطيع الانتقال بحرية تامة يكون عمل القوى الكهرطيسية موجباً:

عم > 0 وعليه $نق_2 - نق_1 > 0$ أو $نق_2 > نق_1$

فيكون الانتقال الآني للدارة بحيث يزداد التدفق الذي يخترقها وفق قاعدة التدفق الأعظمي أو قاعدة مكسويل:

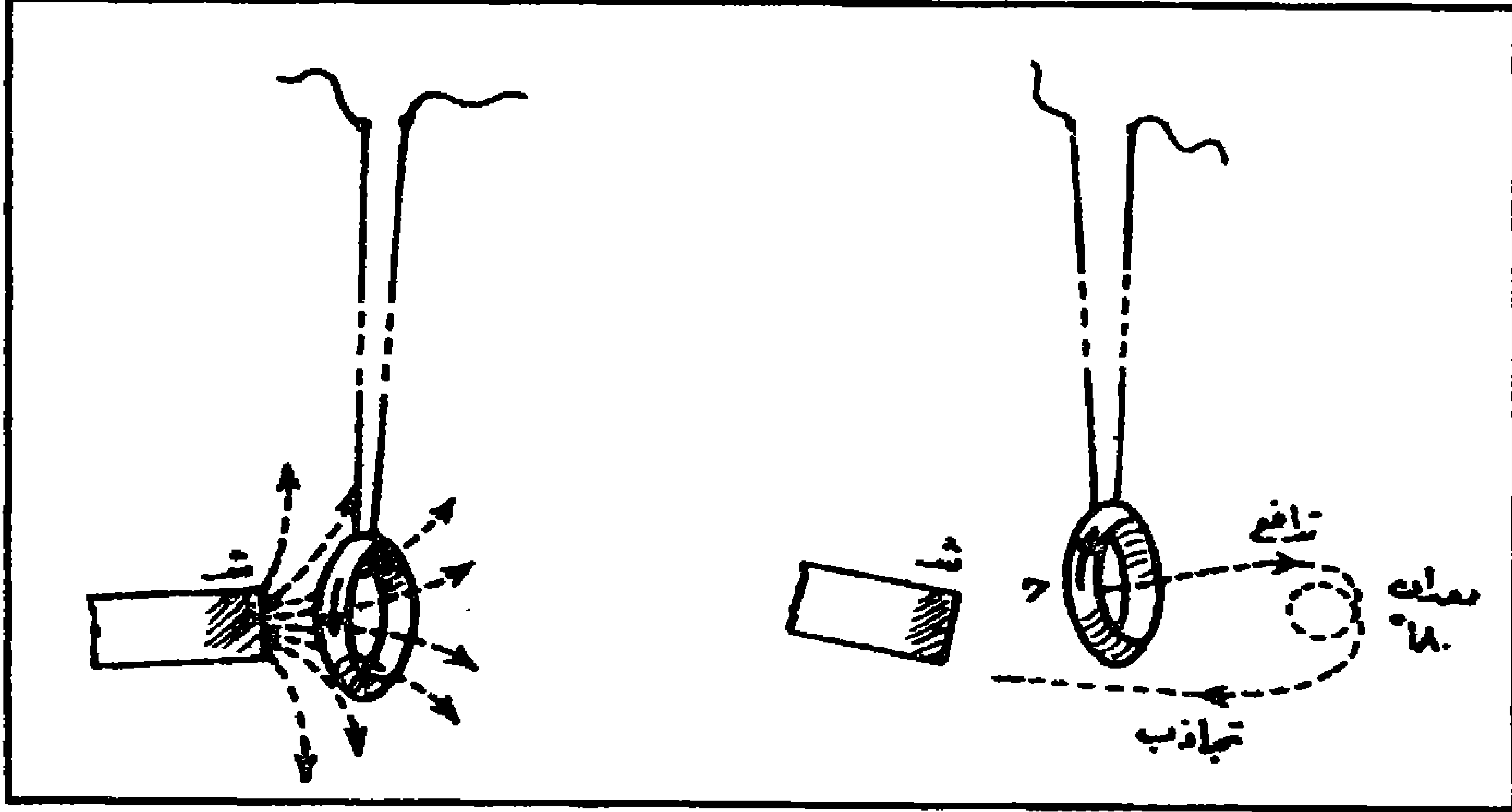
إذا أثر تحريض مغناطيسي في دارة كهربائية، انتقلت بحيث يزداد التدفق الذي يخترقها من وجهها الجنوبي، وتستقر في وضع يكون التدفق به أعظمياً.

ويمكن التحقق بواسطة التجارب التالية من صحة هذا القانون:

تجربة 1: نعلق ملفاً من النحاس بواسطة سلكين رفيعين وطويلين (الشكل 35) يتصلان بقطبي مولد، ويحكم التعليق بحيث يمكن للملف أن يتحرك بحرية تامة.

نقرب من الملف القطب الشمالي لقضيب مغناطيسي، فيبقى ساكناً لا يتحرك، نغلق الدارة فيجري في الوشيعة تيار كهربائي، إذا نظرنا إليه من جهة المغناطيس وجدناه يدور في الوشيعة في جهة عقارب الساعة، أي أن وجه التيار المقابل للقطب الشمالي للمغناطيس جنوبي، فنلاحظ عند مرور للتيار أن الملف يتحرك مقترباً من المغناطيس.

نقطع التيار فيعود الملف إلى وضع اتزانه الشاقولي، نغير جهة التيار فيصبح الوجه المقابل للقطب الشمالي من المغناطيس شمالياً، فنلاحظ أن الملف يرتد بعيداً عن المغناطيس ثم يدور على نفسه 180 درجة، وبعدها يعود فينجذب نحوه.

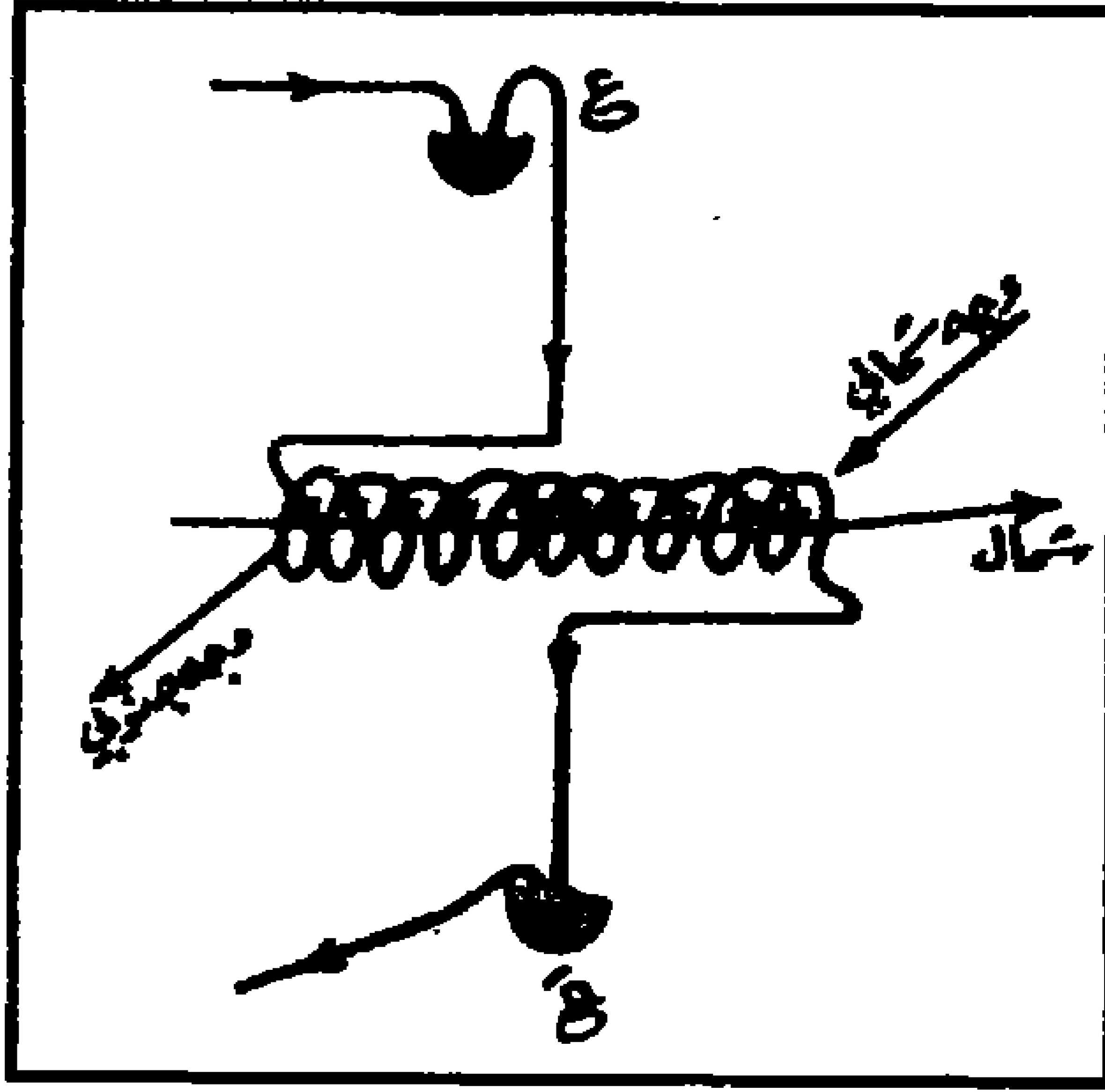


الشكل 35

تجربة2: حركة تيار حلزوني في المجال المغناطيسي الأرضي:

نأخذ وشيعة حلزونية؛ سلكها من النحاس، تستطيع الدوران في مستوٍ أفقي حول محور شاقولي، إذ ينتهي طرفاها في وعاءين من الزئبق موضوعين على المحور الشاقولي ع عَ نلاحظ أن هذه الوشيعة في حالة اتزان مطلق (الشكل 36).

نصل وعاء الزئبق بقطبي مولد فنرى أن الوشيعة تدور حـول المحـور ع عَ ثـم تسـتقر عنـدما ينطبـق محورهـا علـى خـط الـزوال المغناطيسي للمكان، فإذا أزيحت عن وضعها هذا عادت إليه بعـد بضـع ذبـذبات، بحيـث يبقى تدفق التحريض الأرضي الذي يخترقها من وجهها الجنوبي أعظمياً.



الشكل 36

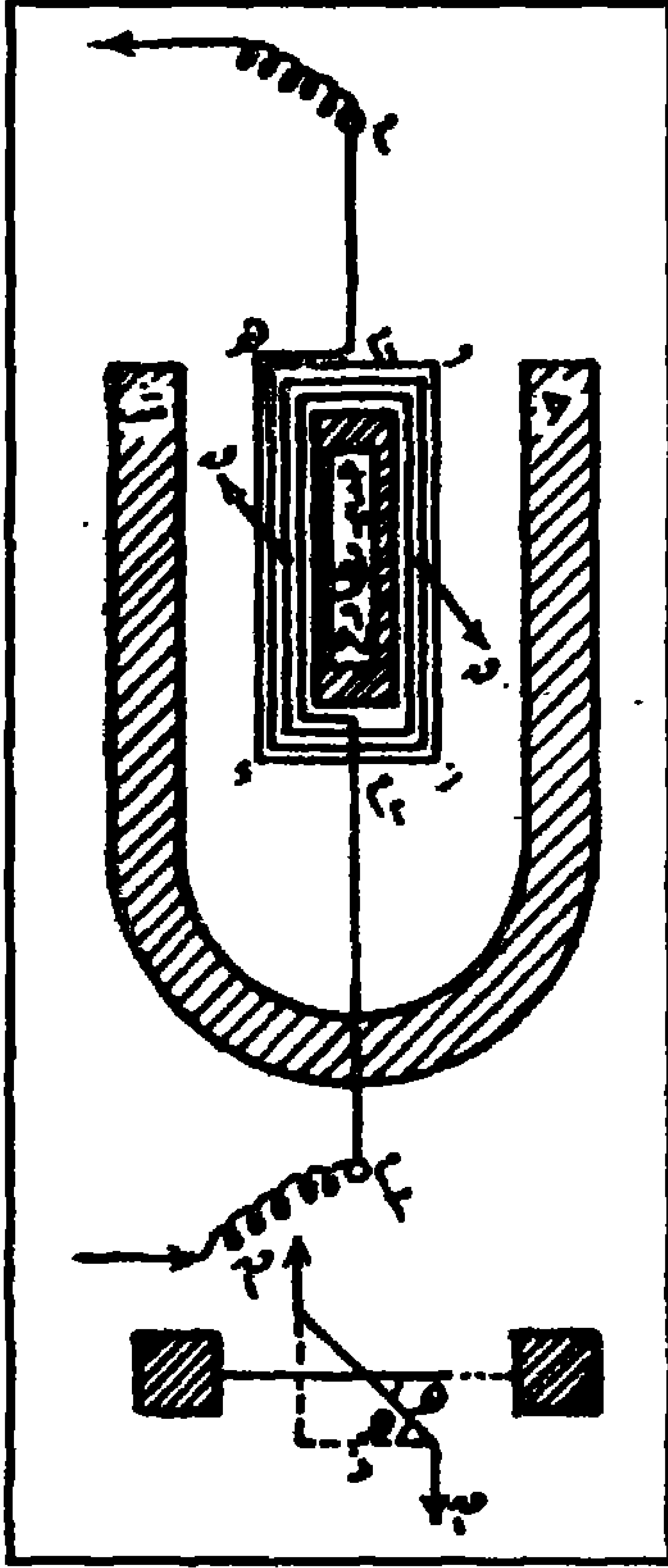
المقياس الغلفاني ذو الإطار المتحرك:

مبدؤه:

تدور الدارة الكهربائية في مجال تحريض مغناطيسـي، بحيـث يـزداد التـدفق الـذي يخترقها من وجهها الجنوبي.

وصفه:

يتألف من إطـار خفيـف مسـتطيل (د هـ و ز) لـف عليـه سـلك نحاسـي رفيـع ومعزول عدة مئات من اللفات، ينتهي طرفا السلك العلوي والسفلي بسلكين معدنيين م $م_1$، $م_2$ $م_3$ يدعيان بسلكي التعليق، يجعل الإطار بواسطتهما شاقولياً بين فرعي



الشكل 37

مغناطيس نضوي ش ـ حـ (الشكل 37) بحيث يكون مستويه موازياً لخطوط مجال تحريضه، ويكون م م3 محور دوران الإطار.

عمله:

عندما يمر التيار، فإن القوى الكهرطيسية تجعل الإطار يدور وينتج عن ذلك فتل سلكي التعليق، فتتكون مزدوجة مقاومة تدعى بمزدوجة الفتل، تحاول إعادة الإطار.

فإذا استقر الاطار بعد أن دار زاوية مقدارها هـ فمعنى ذلك أن عزم القوى التي تحاول متابعة تدويره (القوى الكهرطيسية) يساوي عزم القوى التي تحاول إعادته (قوى الفتل).

لنحسب عزم القوى الكهرطيسية ثم عزم مزدوجة الفتل ولنساوِ بينهما نتيجة لتوازن الإطار ولنستنتج أخيراً علاقة تعطينا شدة التيار المار بالمقياس.

أ. حساب عزم القوى الكهرطيسية بعد أن استقر الإطار:

1. أن القوى الكهرطيسية التي تؤثر في الأضلاع الأفقية هـ و، د ز تكون شاقولية، وبالتالي موازية لمحور الدوران م م3 فعزومها بالنسبة لهذا المحور معدومة.

2. أن كل سلك شاقولي مثل هـ د يكون خاضعاً لقوة كهرطيسية ق مقدارها

ق = ش ل ح

حيث: ح شدة مجال تحريض المغناطيس، ش شدة التيار، ل طول الاطار.

دار جرير للنشر والتوزيع

وكذلك يخضع كل سلك شاقولي مثل (و ز) لقوة مماثلة بالقيمة وموازية بالمنحى لكنها معاكسة بالاتجاه، فإن كان عدد الأسلاك الشاقولية الموجودة على الضلع (و ز) هو (ن)، كانت حاصلة القوى الكهرطيسية التي تؤثر على هذا الضلع هي:

$$ق_1 = ق ن = ش ل ح ن$$

ويكون عدد الأسلاك الشاقولية الموجودة على الضلع هـ د هو (ن + 1)، فباهمال سلك واحد يصبح هذا العدد (ن) ومعنى ذلك أن الإطار يصبح خاضعاً لمزدوجة ندعوها المزدوجة الكهرطيسية ($ق_1$، $ق_1$) عزمها يساوي جداء إحدى القوتين في الذراع.

ولما كان الذراع ذ = ب بجب هـ حيث ب عرض الإطار فإن عزم المزدوجة الكهرطيسية يساوي:

عز = $ق_1$ × ب بجب هـ، وبتعويض ق1 بقيمتها ينتج:

عز = ن ح ش ل × ب بجب هـ، وبملاحظة أن ل × ب = سط (سطح الإطار) ينتج:

عز = ن ح ش سط بجب هـ. فإذا كانت زاوية الدوران صغيرة يمكن اعتبار بجب هـ = 1 ويصبح عزم المزدوجة الكهرطيسية (ق1، ق1) مساوياً إلى:

عز = ن ح ش سط

ب. عزم مزدوجة الفتل:

تدل التجربة أن عزم مزدوجة الفتل يتناسب طرداً مع زاوية الفتل هـ، وعليه:

(عز = ثا. هـ) حيث عز عزم مزدوجة الفتل وثا عدد ثابت ندعوه ثابت الفتل.

ج. شرط توازن الإطار واستنتاج علاقة بين شدة التيار المار بالمقياس وزاوية الفتل:

إن شروط توازن الإطار هو:

عزم مزدوجة الفتل = عزم المزدوجة الكهرطيسية وبالتعويض ينتج:

دار جرير للنشر والتوزيع

ثا هـ = ن ح سط ش ومنه:

$$هـ = \frac{ن ح سط}{ثا} ش$$ وتدعى القيمة $$\frac{ن ح سط}{ثا}$$

بثابت المقياس الغلفاني ويرمز لها بالرمز غ وتصبح العلاقة:

هـ = غ × ش

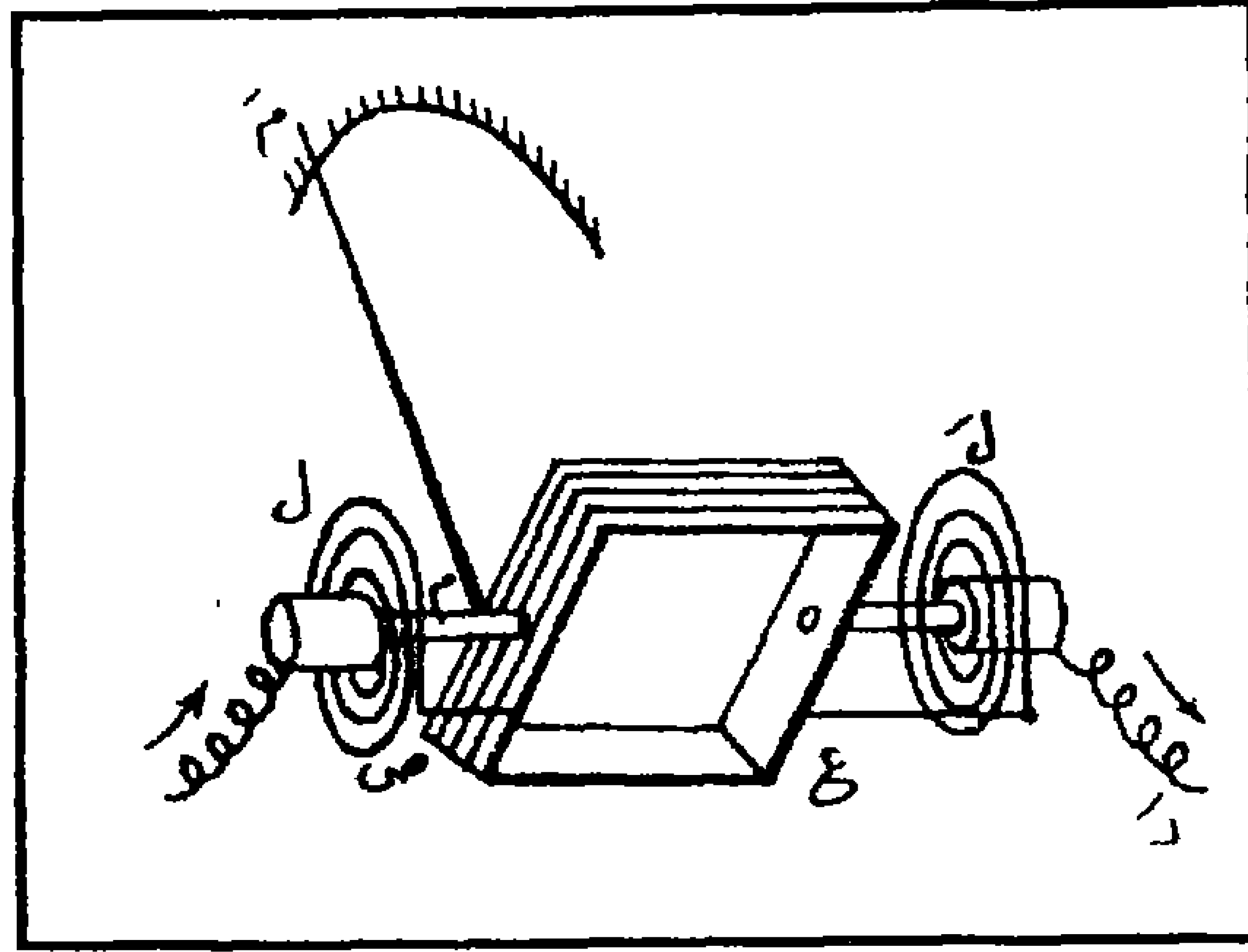
فإذا عرفنا هـ استطعنا أن نعرف ش.

حساسية المقياس الغلفاني:

إذا أمر تيار واحد من مقياسين غلفانيين موصولين على التسلسل، فإن المقياس الذي ينحرف بينهما زاوية أكبر يكون أشد حساسية، ومعنى ذلك أن ثابتة غ أكبر من ثابت الآخر، وعليه تزداد حساسية المقاييس بازدياد غ، ويتم ذلك بزيادة عدد اللفات وزيادة سطح الإطار وزيادة التحريض المغناطيسي للمغناطيس النضوي وانقاص ثابتة الفتل بجعل سلكي التعليق من الفضة.

مقياس الأمبير ذو الإطار المتحرك:

لا يختلف المبدأ الأساسي لهذا الجهاز عن مبدأ المقياس الغلفاني ذي الإطار المتحرك، فهو يتألف مثله من إطار خفيف ص ع يدور حول محور (م) في فجوة واقعة بين نواة من الحديد المطاوع وقطبي مغناطيس نضوي (شـ حـ) ويتصل طرفا سلك الإطار بمربطي الجهاز (د، دَ) بنابضين مستويين ل، لَ يشبهان نوابض الساعة ويحدثان المزدوجة المقاومة. ويدخل التيار الإطار بأحدهما ويخرج منه بالآخر (الشكل 38) وثبتت بالإطار إبرة (م مَ) يستدل من انحراف نهايتها أمام قوس مدرجة بالأمبير على شدة التيار.



الشكل 38

مقياس الفولط ذو الإطار المتحرك:

لا يختلف هذا المقياس عن السابق إلا بتدريجه بالفولط وبمقاومته العظيمة، لذا يجعل سلك إطاره دقيقاً وطويلاً، وتسلسل معه مقاومة كبيرة توضع في داخل الجهاز. هذا وفي بعض الأجهزة يمكن تغيير هذه المقاومة للحصول على الحساسية المطلوبة.

الأسئلة

1) يجتاز تيار شدته 20 أمبير سلكاً أفقياً عمودياً على مستوى الزوال المغناطيسي. فما القوة الكهرطيسية التي تفعل في كل متر من طوله. وما تصبح هذه القوة إذا وضع السلك في مستوى الزوال المغناطيسي على أن يبقى أفقياً. المركبة الأفقية للتحريض الأرضي 2×10^{-5} تسلا وزاوية الميل °60.

الأجوبة: 8×10^{-4} نيوتن، 6.93×10^{-4} نيوتن

2) نصف قطر دولاب بارلو 8 سم ويقع نصفه السفلي في مجال تحريضي شدته 5×10^{-2} تسلا عمودي على مستويه. فإذا كانت شدة التيار 20 أمبير احسب قيمة الوزن اللازم وضعه في طرف نصف قطره الأفقي لمنعه عن الدوران.

وإذا دار الدولاب السابق دورتين في الثانية احسب الاستطاعة بالواط لهذا المحرك الصغير.

الأجوبة: 0.04 نيوتن، 0.04 واط.

3) يتعامد سلك نحاسي طوله 2 سم مع تحريض مغناطيسي شدته 0.1 تسلا فإذا اجتاز السلك تيار شدته 20 أمبير، احسب القوة ق التي تفعل في السلك. وماذا تصبح هذه القوة إذا أصبحت الزاوية بين السلك وخطوط قوة التحريض المغناطيسي °45.

الأجوبة: 4×10^{-2} نيوتن، 2.82×10^{-2} نيوتن

4) دارة كهربائية سطحها 10 د $م^2$ ويجتازها تيار شدته 20 أمبير. وضعت هذه الدارة متعامدة مع خطوط قوة مغناطيسية لتحريض منتظم شدته 0.1 تسلا. احسب العمل الكافي لإخراج هذه الدارة خارج المجال.

الجواب: 0.2 جول

الفصل السادس

الزمان

الفصل السادس

الزمان

ما نوع العملية المتصلة التي يمكن أن تستخدم لضم فواصل الزمان؟ سنواجه في الحال بصعوبة شديدة. لأننا لا يمكننا أن نعالج الفواصل الزمانية بنفس الطريقة التي نعالج بها المسافات المكانية. أو بعبارة أكثر تحديداً، تدل نهايات الأجسام الصلبة على فواصل مكانية، في حين لا توجد حدود قاطعة للزمان يمكن وضعها جنباً إلى جنب لتؤلف خطاً مستقيماً.

ولنفترض هذين الفاصلين: طول حرب معينة منذ أول طلقة نار وحتى آخر طلقة فيها، ودوام عاصفة رعدية معينة منذ أول قصفة رعد فيها وحتى آخرها. كيف يمكننا ضم هذين الدوامين؟ لاشك أن لدينا هنا حادثين متفرقين لكل منهما طول معين من الزمن، ولكن ليس ثمة وسيلة لاستحضارهما معاً. وبالطبع لوكان هذان الحادثين قد وقعا معاً في زمن سابق، لأمكننا أن نتعرف على تلك الحقيقة، ولكننا لا نستطيع أن نبدّل الحوادث من حولنا كما نبدّل نهايات الموضوعات الفيزيائية.

وأفضل شيء يمكن فعله هو أن نتمثل فاصلين زمنيين في مقياس تصوري. افترض أن لدي حادثاً س تحرك من النقطة الزمنية أ إلى النقطة الزمنية ب، وحادثاً آخر ص تحرك من النقطة الزمنية ب إلى النقطة الزمنية جـ (انظر الشكل 1). إن النقطة الابتدائية للحادث ص هي نفس النقطة النهائية للحادث س، ولذلك فالحادثان متقاربان في الزمان. ولا يمكننا دفعهما إلى هذا الموضع - ذلك لأنهما حدثا بهذه الكيفية.

ويمكن الآن ملاحظة طول الزمن من النقطة أ إلى النقطة جـ على اعتبار أنه ضم لـ س وص، وبالطبع لا يمكن ضم الأطوال هذه بالوسيلة الفيزيائية، ولكننا نفعل هذا بوسيلة تصورية، ذلك لأنه عن طريق هذه الوسيلة يمكننا أن ننظر إلى هذا الموقف. ويرمز إلى العملية التصورية بالرمز "5"، حيث أنه يسمح لنا أن نصوغ قاعدة الإضافة التالية لمقياس الطول الزمني ز:

ز (س 5 ص) = ز (س) + ز (ص)

وبكلمات أخرى، لو حصلنا على حادثين، بحيث يبدأ الواحد منهما من حيث ينتهي الآخر، إذن لكان طول الحادث الكلي، هو الاختصار الحسابي لأطوال الحادثين. وبالطبع ليس هذا في قوة قاعدة الإضافة الخاصة بالأطوال الفراغية، لأننا لا نستطيع أن نطبقها إلا على حوادث تحدث متقاربة في الزمان، وليس على أية حوادث كيفما اتفق، وأخيراً بعد أن طورنا القاعدة الثالثة لنسق قياس الزمن، سيكون في مقدورنا أن نقيس الأطوال المتجاورة لحوادث غير متقاربة. وعلينا الآن أن نبحث فقط عن عملية ضم تزودنا بأساس لقاعدة الإضافة. وهذه العملية نجدها في حدوث حوادث متقاربة في الزمان.

ولكي نكمل خطتنا، فإننا نحتاج إلى قاعدتين إضافيتين: قاعدة المساواة، وقاعدة أخرى تعرّف لنا الوحدة. وكل من هاتين القاعدتين يقومان على نموج ما من عملية دورية: تأرجح البندول، دوران الأرض، وهكذا. إذ أن أية ساعة ما هي إلا آلة تعمل طبقاً لعملية دورية، وهناك بعض الساعات التي تعمل ببندول، وأخرى تعمل بميزان الساعة (الرقاص). كما أن مزولة الشمس (الساعة الشمسية) تقيس الزمن بواسطة الحركة الدورية للشمس عبر السماء. ولقد وضع العلماء منذ آلاف السنين، وحداتهم للزمن على أساس طول اليوم، وتقوم هذه الوحدات على الدوران الدوري للأرض. والآن معدل دوران الأرض يتغير بشكل طفيف، توصل العلماء في عام 1956 إلى اتفاق عالمي لحساب وحدات الزمن على أساس حركة الأرض حول الشمس في عام

واحد معين. وعرّفت الثانية طبقاً لذلك بأنها 1/ 31، 556، 97470925 من العام 1900. وفي عام 1964 تخلوا عن هذا النظام، ووجدوا أن النظام الأكثر إحكاماً والذي يمكن الحصول عليه، هو حساب الثانية على أساس معدل الاهتزاز الدوري للسيزيوم الذري(*). إن هذا المفهوم للدورية Periodicity ضروري جداً لتعريف وحدات الزمن، ولابد أن يكون مفهوماً بشكل كامل، قبل أن نضع في اعتبارنا كيف يمكن لنا أن نؤسس قاعدة التساوي، وقاعدة الوحدة عليها.

وينبغي أن نميز أولاً، وبوضوح بين معنيين "للدورية"، أحدهما ضعيف، والآخر قوي. بالمعنى الضعيف، العملية تكون دورية ببساطة، لو أنها تحدث المرة تلو الأخرى. مثل نبضات القلب، وتأرجح البندول. ولكن بالمعنى الضعيف أيضاً خروج السيد سميث من منزله. فهو يحدث مراراً وتكراراً. بل مئات المرات طوال حياة السيد سميث. ويتضح أن الدوري بمعناه الضعيف إنما هو لكونه متكرراً. وفي بعض الأحيان يعني الدوري أن هناك دائرة كلية لأشكال مختلفة تتكرر بنفس الانتظام الدائري. إذ أن البندول يتأرجح على سبيل المثال، من أخفض نقطة له إلى أعلاها على اليمين، ثم يعود مرة أخرى إلى أخفض النقطة ذاتها مرتفعا إلى أعلاها على اليسار، ثم يعود مرة أخرى إلى أخفض النقطة ذاتها، وهكذا. إذن تكرار حركة البندول تتم في دائرة كاملة، وليس نتيجة لحادثة واحدة. وغنما تنيجة لتكرار عدة حوادث.ومع ذلك، لا يكون هذا ضرورياً لكي نسمي عملية ما أنها دورية. إذ يكفي أن مظهراً واحداً من العملية يستمر في التكرار، وحينئذٍ تكون مثل هذه العملية، دورية بالمعنى الضعيف.

وفي أحيان كثيرة، عندما يقول شخص ما أن العملية دورية، فهو يعني بها أنها أكثر قوة، وذلك لأنها بالإضافة إلى كونها دورية بشكل ضعيف، فمن الصحيح أيضاً أن الفواصل بين الحوادث المتعاقبة، لشكل معين تكون متساوية.وفيما يختص برحيل

(*) السيزيوم Cesium هو العنصر الفلزي (المترجم).

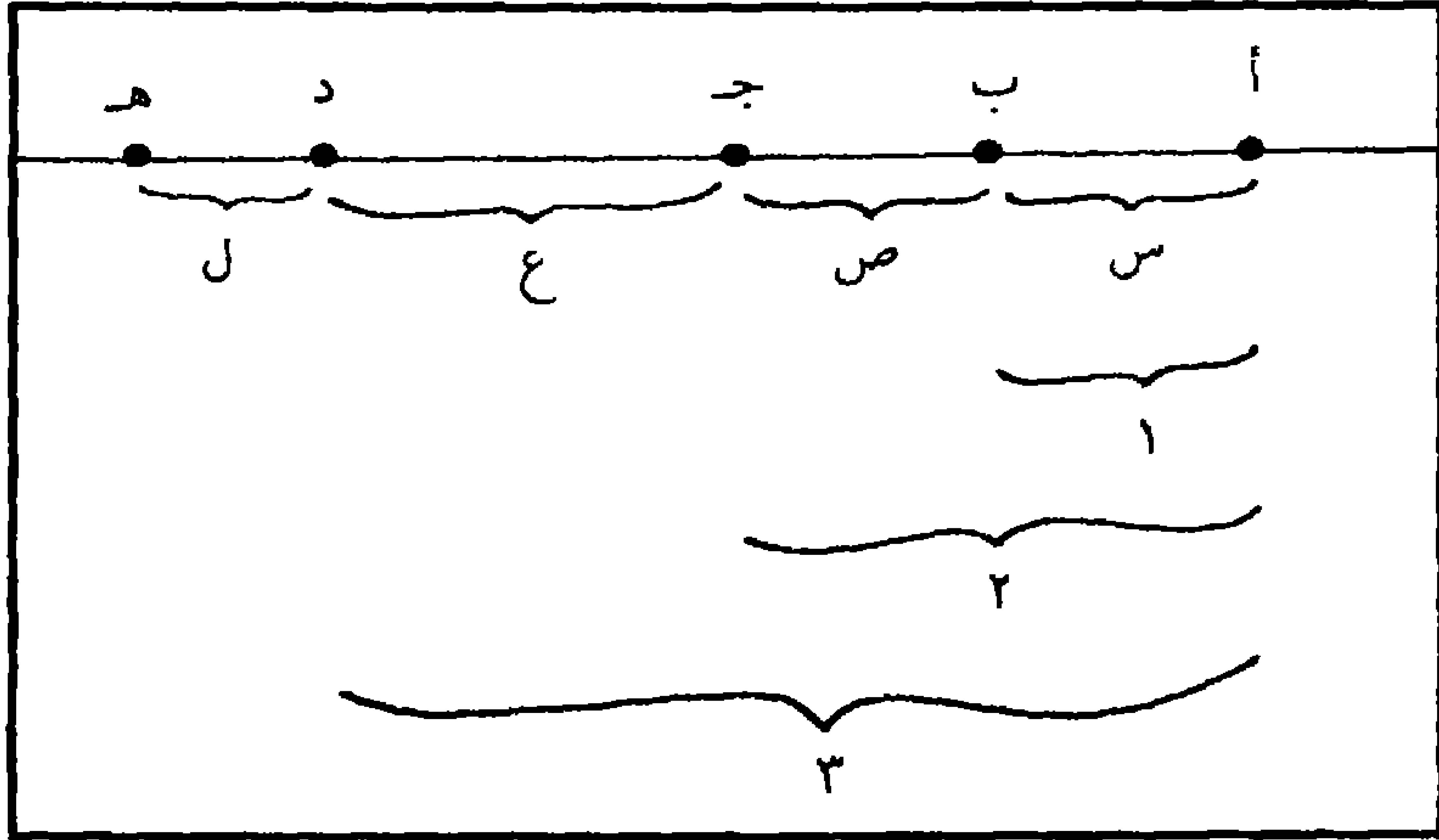
السيد سميث من منزله، لم يتحقق هذا الشرط بوضوح. إذ ربما يظل في منزله عدة ساعات، في بعض الأيام، وفي أيام أخرى، ربما يغادر المنزل عدة مرات خلال ساعة واحدة. وعلى العكس من ذلك، تعتبر حركات تأرجح البندول في ساعة دقيقة الصنع، دورية بالمعنى القوي. إذن هناك اختلاف كبير وواضح بين نموذجي الدورية.

فأي نموذج للدورية ينبغي علينا أن نأخذ به كقاعدة لقياس الزمن؟ لا شك أننا نميل إلى الإجابة بأننا ينبغي أن نختار عملية يكون فيها الدوري بالمعنى القوي. إذ لا يمكننا أن نؤسس مقياساً للزمن على مغادرة السيد سميث لمنزله، لأن هذا غير منتظم على الاطلاق. كما أننا لا يمكننا ان نؤسسه على النبض، لأنه على الرغم من أن النبض أكثر ارتباطاً بالدورية من رحيل السيد سميث، إلا أنه يظل غير منتظم بشكل كاف. فلو كان شخص ما يجري بسرعة أو إصابته حمى عالية لكان نبضه أسرع من الطبيعي. إذن ما نحتاجه هو عملية دورية بأقوى معنى ممكن.

ولكن هناك شيئاً ما خطأ في هذه المسألة. وهو أننا لا نستطيع أن نعرف أن العملية دورية بالمعنى القوي، دون أن يكون لدينا بالفعل طريقة أو منهج لتحديد فواصل متساوية للزمان! وهذه الطريقة شبيهة تماماً بما نحاول أن نؤسسه بقواعدنا. إذن كيف يمكننا التخلص من هذا الدور؟ لا يمكننا أن نتخلص منه إلا بالاستغناء تماماً عن متطلب الدورية بالمعنى القوي. ونحن مضطرون إلى هذا الاستبعاد، لأننا لم نتوصل بعد إلى قاعدة للتعرف على الدورية بالمعنى القوي. وهذا الموقف يشبه تماماً موقف الفيزيائي الساذج الذي يقترب من مشكلة قياس الزمن دون أن تكون لديه حتى ميزة التصورات قبل العلمية لفواصل الزمن المتساوي. وبدون أية قاعدة مهما كانت، نراه يبحث عن عملية دورية تكون خاضعة للملاحظة في الطبيعة، هذه الطبيعة التي يعول عليها في إيجاد مثل هذه القاعدة. ولأنه يفتقر إلى وسيلة يقيس بها فواصل الزمن، نجد أن ليس لديه وسيلة لاكتشاف ما إذا كانت هذه العملية المعينة دورية بالمعنى القوي أم لا.

والحقيقة أن ما ينبغي علينا علميه في المحل الأول، هو أن نتوصل إلى عملية دورية بالمعنى الضعيف (وربما تكون هذه العملية بالمعنى القوي، كما يمكن أن يكون شيئاً لا يمكننا التعرف عليه بعد). وعندئذ نستخدم هذه العملية باعتبارها إجراء لضم فاصلين متتاليين من الزمن، بمعنى أن الواحد منهما يبدأ، عندما ينتهي الآخر تماماً، ثم نثبت بعد ذلك، طبقاً لقاعدة الإضافة، أن طول الفاصل الكلي إنما هو اختصار رياضي لأطوال فاصلين مركبين. ومن ثم نستطيع أن نطبق هذه القاعدة على أية عملية دورية مختارة.

ولكي نستكمل رسمنا التخطيطي، علينا أن نتوصل إلى قاعدة للمساواة وأخرى للوحدة ودوام أي واحدة من فترات العملية المختارة، يمكن استخدامه باعتباره وحدتنا للزمن. وهذه الفترات مرسومة في الشكل2، وهي تمثل الأطوال س، ص، ع، ل... بين نقاط الزمن أ، ب، جـ، د، هـ ... بحيث يكون لكل جزء من هذه الأجزاء، طول لوحدة واحدة.



الشكل 2

ويمكن لشخص ما أن يعترض: "ولكن الفترة ص أطول كثيراً من الفترة س" ونـرد عليه بقولنا: "إننا لا نعرف ما تعنيه بكلمة أطول". إذ أننا نحاول الآن وضع قواعد لمقياس الزمن، وبعد ذلك سوف نتمكن من إعطاء معنى لكلمة "أطول".

والآن، نجحنا في تعيين وحدتنا (وهي ببساطة طول كل فترة من العملية المختارة)، غير أن قاعدة الإضافة تمدنا بأساس لقياس أطوال الـزمن. وتخبرنـا هـذه القاعـدة بـأن الفاصل الزمني من النقطة أ إلى النقطة جـ هو 2، ومـن النقطـة أ إلى النقطـة د هـو 3، وهكذا. ونستطيع الآن أن نقيس أي فاصل للزمن، حتى على الـرغم مـن أننـا أسسـنا إجراءنا على عملية دورية ضعيفة، وذلك بأن نحسب ببساطة عدد المرات الـتي تحـدث فيها وحدة الفترة، في ذات الوقت الذي يحدث فيـه الحـادث الـذي نرغـب في قياسـه. وسوف يكون هذا العدد هو طول الحادث. أما قاعدة المساواة فهي واضحة. أنها تذكر أن الفاصلين الزمنيين (اللذين ربما يكونان منفصلين بفترات زمنية واسعة) يتساويان إذا كان كل منهما يحتوي على نفس عدد الفترات الابتدائية للعملية الدورية. وهذا يكمـل القاعدة الثالثة في الخطة، لأننا نكون بذلك قد حصلنا على قاعـدة للمسـاواة، وقاعـدة للإضافة، وقاعدة للوحدة. وعلى أساس هذه الخطة نتوصل إلى منهج لقياس الزمن.

وربما كون هناك اعتراضات. هل يمكن حقاً لمثل هذه الخطة أن تكون أساساً لأية عملية دويرة ضعيفة؟ أي هل يمكن مثلاً أن تكون أساساً لرحيل السيد سميث من منزله؟

الرد المدهش على ذلك هو، نعم. أقول هذا على الرغم من أن هناك قوانين في الفيزياء – وسوف أتناول هذا بالشرح بعد لحظة – أبسط كثيراً، بحيث تمكننا من أن نختار عمليات أخرى معينة. غير أن النقطة الهامة التي ينبغي علينا أن نفهمها هنا، هي أننا إذا حصلنا، ولو لمرة واحدة، على خطة تعد أساساً لقياس الزمن – حتى على الرغم من أنها قد تقوم على عملية غير منتظمة، كما هو الحال في رحيل السيد سميث من منزله – فإننا بذلك نكون قد اكتسبنا وسائل لتحديد ما إذا كانت هذه العملية الدورية مناسبة لعملية أخرى أم لا.

افترض أننا تبنينا العملية الدورية م. من أجل قاعدة مقياس الزمن، ونريد الآن مقارنة م بعملية دورية أخرى، ولتكن ن، حتى نرى ما إذا كانت م مكافئة أم لا. افترض مثلاً أن م هي تأرجح لبندول قصير ما، وأننا نرغب في مقارنتها بـ ن التي هي تأرجح لبندول أطول. من وجهة النظر العملية لا يمكن أن تكون فترات البندولين متساوية. إذن كيف نقارن بين الاثنين؟ أننا في الحقيقة نقارن بينهما عن طريق حساب تأرجحات البندولين أثناء فاصل زمني أطول. وقد نكتشف أن عشرة تأرجحات من البندول القصير يوافق ستة تأرجحات من الطويل. ويحدث هذا في كل مرة نعيد فيها الاختبار. وحيث أننا لم نتعامل بعد مع أجزاء من الفترات، لذلك ينبغي أن تكون مقارنتنا في حدود الأعداء الصحيحة من التأرجحات. ومع ذلك قد نلاحظ أن التزامن فيها ليس دقيقاً. إذ بعد عشرة تأرجحات للبندول القصير، يكون الطويل قد بدأ في تأرجحه السابع. وفي هذه الحالة علينا أن نكرر المقارنة بأن نأخذ فاصلاً زمنياً أطول. مثل مائة فترة للبندول القصير. ونكتشف أن زمن الاختبار كله يتكرر، وأنه أثناء هذا الفاصل، كان للبندول الطويل اثنتان وستون فترة. وبهذه الطريقة نتمكن من ضبط

المقارنة إلى أقصى درجة نتمناها. وإذا وجدنا أن عدداً معيناً من فترات العملية م متكافئ دائماً مع عدد معين من فترات العملية ن، نقول أن الفترتين الدوريتين متكافئتان.

وهذه حقيقة من حقائق الطبيعة، أن تكون هناك فئة واسعة جداً من العمليات الدورية التي تتكافأ كل منها مع الأخرى بهذا المعنى. ولا يمكن معرفتها قبلياً. فهي تكتشف عن طريق ملاحظة العالم، ولا يمكننا القول أن هذه العمليات المتكافئة دورية بشكل قوي، ولكن يمكننا أن نقارن أي اثنتين منهما، ونتبين أنهما متكافئتان. وتنتمي كل البندولات المتأرجحة إلى هذه الفئة، وكذلك حركات موازين الساعة في المنبهات وساعات اليد، والحركة الظاهرية للشمس عبر السماء، وهكذا. إذن نجد في الطبيعة فئة ضخمة من هذه العمليات التي إذا قارنا أي عمليتين منها بالطريقة التي شرحناها في الفقرة السابقة، لبرهنا على أنهما متكافئتان. وعلى قدر علمنا توجد فئة واسعة واحدة فقط من هذا النوع.

فماذا يحدث لو قررنا أن نقيم مقياسنا للزمن على عملية دورية لا تنتمي إلى هذه الفئة الواسعة من العمليات المتكافئة، كنبضات القلب مثلاً؟ لابد أن تكون النتيجة غريبة بعض الشيء. ولكننا نريد أن نشدد على أن اختيار نبضات القلب لمقياس الزمن لن يؤدي إلى أي تناقض منطقي. إذ ليس هناك معنى أن نزعم أن مقياس الزمن على مثل هذا الأساس، إنما هو "باطل".

تخيل مثلاً أننا نعيش في عصر مبكر جداً من تطور مفاهيم القياس، بالطبع لن تكون لدينا أداة لقياس الزمن، مثل ساعة اليد، وبالتالي لن تكون لدينا وسيلة لتحديد كيفية اختلاف نبضات القلب تحت ظروف فسيولوجية مختلفة. أننا نبحث، منذ الوهلة الأولى عن أحكام عملية لتطور مقياس الزمن، ونقرر استخدام نبضات قلبي كأساس للقياس.

وحالما نقارن نبضات قلبي بعمليات دورية أخرى في الطبيعة، نجد أن كل أنواع العمليات التي اعتقدنا أنها مطردة، أصبحت خلاف ذلك. ونكتشف على سبيل المثال أنني عندما أكون في حالة جيدة، فإن الشمس تعبر السماء خلال عدد معين من نبضات القلب في زمن معين، وإنني عندما أصاب بحمى في أيام أخرى، فإن عبور الشمس يستغرق عدداً أكبر بكثير.

وعلى الرغم من أن هذا يبدو غريباً، إلا أنه ليس ثمة تناقض منطقي في وصفنا للعالم الكامل Entire World على هذا الأساس. إذ لا يمكننا أن نقول أن البندول اختيار "صادق"، وأن نبضات قلبي اختيار "كاذب"، كأساس لوحدة الزمن. لأن الصدق أو الكذب لا يدخلان هنا، نظراً لعدم وجود تناقض منطقي في أي حالة من هاتين الحالتين، ولكنه فقط اختيار بين وصف بسيط للعالم، ووصف معقد(*).

فإذا أقمنا الزمن على نبضي، نقول أن كل أنواع العمليات الدورية في الطبيعة لها فواصل زمنية متغيرة تعتمد على ما أفعله أو ما أشعر به. فإذا عدوت فترة من الوقت ثم توقفت عن العدو، وقمت بعمل قياس لهاتين العمليتين الطبيعيتين بوسائل نبضي، لوجدت أنه في لحظة عدوي، وبعدها بوقت قصير، فإن الحوادث في العالم تبطئ. وبعدها بثوان قليلة تعود إلى طبيعتها الأولى مرة أخرى. وأرجو أن تتذكر أننا نفترض أنفسنا نحيا في عصر لم نتعرف فيه بعد على أية معرفة بقوانين الطبيعة. فليست لدينا ثمة مراجع في الفيزياء تخبرنا ان هذه العملية أو تلك مطردة. وأنه في نظامنا الابتدائي للفيزياءن فإن دوران الأرض حول محورها، وتأرجح البندولات وهكذا، تعد أشياء

(*) وهذا الأمر شبيه بتفسير كل من بطليموس وكوبرنيق للظواهر الفلكية، إذ أن التنبؤ بالحوادث الفلكية التي قام بها بطليموس لم تكن تختلف كثيراً عن الحوادث الفلكية التي تنبأ بها كوبرنيق. فحركة الأجسام السماوية طبقاً لرسم بطليموس لا تقل في دقتها عما وضعه كوبرنيق. ولكن النسق الكوبرنيقي كان أكثر بساطة وانسجاماً من النسق البطليموسي. (المترجم).

غير منتظمة بدقة، إذ أن لها سرعة معينة عندما أكـون في حالـة جيـدة، وأخـرى عنـدما أكون مصاباً بحمى.

وهكذا فإن اختيارنا الأصلي الذي نعمل طبقاً له هنا، لـيس اختيـاراً بـين إجـراء قياس صحيح وآخر خاطئ، ولكنه اختيار قائم علـى البسـاطة. فـإذا اخترنـا البنـدول كأساس للزمن، فإن النظام المؤدي إلى قوانين فيزيائية سوف يكون أبسط كثيراً، مما لـو اخترنا نبضات قلبي. ولكن على الرغم من أن اختيارنا لنبضات القلب معقـد إلى حـد ما، إلا أنه أرحم من اختيار لرحيل السيد سميث مـن منزلـه. هـذا إذا لم يكـن سـيدنا سميث شبيهاً بعمانويل كانط، الذي قيل عنه أن كان يخرج من منزله في نفـس الوقـت تماماً من كل صباح، حتى أن الناس في المدينة كانوا يضبطون ساعاتهم عنـد ظهـوره في الشارع(**). ولكن من غير الطبيعـي أن نأخـذ تحركـات شـخص مـا، حياتـه معرضـة للفناء، قاعدة مناسبة لقياس الزمن.

وأعني بكلمة "مناسبة" طبعاً، أنها ملائمة بـالمعنى الـذي يـؤدي إلى قـوانين بسـيطة. فعندما نقيم مقياسنا للزمن على تأرجح البندول، نجد أن العالم الكلـي يسـلك بطريقـة منتظمة إلى حد بعيد، ويمكن وضعه بقوانين غاية في البساطة. وربما لا يجد القارئ هـذه القوانين البسيطة عند دراسته للفيزياء، ولكنها بسـيطة بـالمعنى النسـبي للكلمـة، لأنهـا ممكن أن تكون أكثر تعقيداً إذا تبنينا نبضات القلب كوحدة للـزمن. ومـن ثـم نجـد أن الفيزيائيين يعربون دائماً عن دهشتهم مـن بسـاطة القـوانين الحديثـة. فعنـدما اكتشـف اينشتين مبدأه العام في النسبية، اعتورته الدهشة من حقيقة أن مثل هـذا المبـدأ البسـيط

(**) اشتهر عن كانط (1724 – 1804) الفيلسوف الألماني المعروف، أن حياته كانـت منظمـة انتظامـاً آلياً كساعة دقيقة، محكمة الصنع. فهو يستيقظ في الصباح، ثم يشرب قدحاً من القهوة، ثم يكتب، ثم يقرأ محاضراته الجامعية، ثم يتناول وجبة من الطعام، ثم يتنزه، كل هذا في موعده المحدد الدقيق. وكان جيرانه في مدينة كونجسبرج يعرفون أن الساعة قد شارفت منتصف الرابعة حينما كان كـانط يغادر باب منزله (المترجم).

المتعلق بالنسبية، يتحكم في جميع الظواهر التي ينطبق عليها. فإذا أقمنا نظامنا لقياس الزمن على عملية لا تنتمي إلى فئة واسعة جداً من العمليات المتكافئة بالتبادل، فإن هذه البساطة سوف تختفي.

وعلى العكس من ذلك، ينتمي نبض قلبي إلى فئة ضيقة جداً من العمليات المتكافئة، إذ ربما يتدخل أعضاء جدد في الحوادث المحتملة التي قد تؤثر على جسمي، ذلك الجسم الذي يرتبط فسيولوجياً بنبضات القلب. فعلى الرغم من أن النبض في رسغي الأيسر مكافئ للنبض في رسغي الأيمن، فإنه من الصعب أن نجد عملية أخرى، في مكان ما في الطبيعة، تكون متكافئة مع نبضي. وهكذا، نجد هنا فئة ضيقة جداً من العمليات المتكافئة، بالمقارنة بواحدة من الفئات الشاملة جداً، والتي تتضمن حركات الكواكب، وتأرجح البندولات، وهكذا. ولذلك يستحسن أن نختار عملية من هذه الفئة الواسعة، ونتخذها أساساً لقياس الزمن.

ولا يهم كثيراً أي واحدة من عمليات هذه الفئة نتخذ، لأننا لسنا مشغولين بعد بقياس شديد الأحكام. فما علينا إلا أن نختار عملية واحدة، وأن نذكر أن العملية المختارة، دورية بالمعنى القوي، وهذه العملية بالطبع، إنما هي مجرد موضوع للتعريف فحسب، ولكن إذا كاغنت العمليات الأخرى المتكافئة معها دورية بشكل قوي، وبطريقة غير مبتذلة، لن تكون موضوعاً للتعريف فحسب. لأننا نجري اختبارات امبيريقية، وعن طريق الملاحظة نتبين أنها دورية بالمعنى القوي، فهي تظهر أطراداً كبيراً في فواصل الزمن. ونتيجة لذلك، نصبح قادرين على وصف عمليات الطبيعة بطريقة بسيطة نسبياً. وهذه النقطة شديدة الأهمية، لدرجة أنني أؤكد عليها مراراً وتكراراً. إذ أن اختيارنا لعملية كأساس لقياس الزمن ليست موضوعاً للصواب والخطأ. فأي اختيار ممكن منطقياً، وأي اختيار سوف يؤدي إلى مجموعة متسقة من القوانين الطبيعية، ولكن إذا أقمنا مقياسات للزمن على عمليات بالمعنى القوي، كتأرجح بندول، نجد أنها تؤدي إلى فيزياء أكثر بساطة، مما لو استخدمنا عمليات أخرى معينة. لاشك أن حسناً

الفسيولوجي للزمن، وشعورنا الحدسي للانتظام، قد دخل تاريخياً في اختياراتنا المبكرة للعمليات التي نتخذها أساساً لقياس الزمن. فالشمس لأنها تشرق وتغرب بانتظام، أصبحت المزاول الشمسية وسيلة مناسبة لقياس الزمن. فهي مناسبة أكثر من حركات السحب مثلاً. وبالمثل وجدت الثقافات البدائية أن تقيم الساعات على زمن سرعة الرياح، أو مجرى المياه، أو عمليات أخرى كانت تتوافق بشكل أو بآخر مع حركة الشمس. ولكن تبقى النقطة الأساسية، ألا وهي أن الاختيار يتم في حدود التكافؤ والبساطة.

الفصل السابع

الجاذبية الأرضية

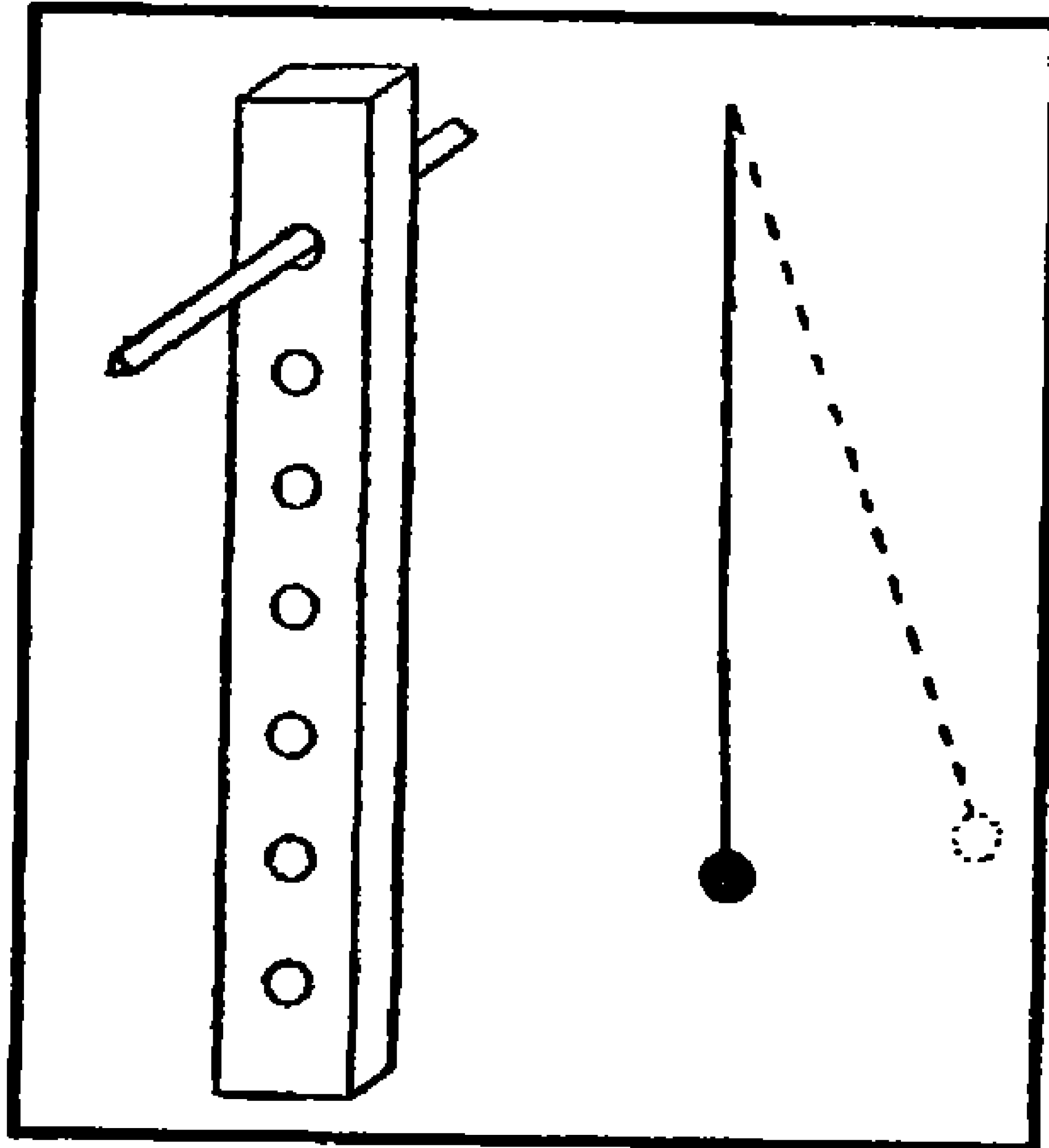
الفصل السابع

الجاذبية الأرضية

إن أي جسم يتحرك على سطح الأرض يخضع لتأثير الجاذبية الأرضية لذا فإن عجلة الجاذبية الأرضية هي ثابت هام من ثوابت علم الطبيعة وهي تساوي 981 سم/ث2 تقريباً وتجري تجارب مختلفة للحصول على هذا الثابت نذكر منها البندول البسيط، واهتزاز كتلة معلقة في سلك زنبركي.

تحقيق قانون البندول البسيط وإيجاد عجلة الجاذبية الأرضية:

إذا علقت كرة صغيرة من معدن كثيف من طرف خيط وثبت الطرف العلوي في نقطة ثابتة فإن الكرة تأخذ الوضع الرأسي في حالة السكون، وإذا أزيحت الكرة إزاحة جانبية صغيرة وتركت بعد ذلك لتهتز فإنها تحدث حركة اهتزازية ويسمى هذا الجهاز 'البندول البسيط' شكل (1أ) وذلك تمييزاً له عن البندول المركب الذي يتكون من أي جسم مثلاً قضيب من المعدن يهتز حول نقطة تعليق ثابتة في الجسم شكل (1 ب) ففي الحالة الأولى تدرس حركة البندول على أنها نقطة مادية ولذا فهناك قانون بسيط لزمن الاهتزازة الواحدة للبندول فإذا رمزنا لزمن الاهتزازة الكاملة للبندول أي الدور



شكل 1

[وهو زمن انتقال الكرة من أقصى اليمين إلى أقصى الشمالي ثم عودتها ثانية إلى أقصى اليمين] بالرمز ن ورمزنا لطول البندول [وهو البعد بين نقطة التعليق ومركز الكرة] بالرمز ل ولعجلة الجاذبية الأرضية بالرمز جـ والنسبة التقريبية بالرمز ط فإن:

$$ن = 2ط \sqrt{\frac{ل}{جـ}}$$

ومن هذا القانون يتضح أن الدور [زمن اهتزازة أي ذبذبة كاملة] يتوقف على طول البندول فكلما زاد الطول ازداد الدور ولكن ليس بصفة طردية إذ أن ن $\propto \sqrt{ل}$ أو ن$^2 \propto$ ل فإذا أريد تحقيق صحة هذا القانون نرسم علاقة بيانية بين ن^2 على المحور الصادي، ل على المحور السيني فنحصل على خط مستقيم ميله هو $\frac{4ط^2}{جـ}$ فإذا أجرينا التجربة وحصلنا على خط مستقيم يكون هذا تحقيقاً لصحة القانون وبحساب ميله والتعويض عن ط يمكن حساب عجلة الجاذبية الأرضية.

خطوات العمل:

نربط كرة من الرصاص أو المعدن من طرف خيط ذي طول مناسب متر مثلاً وتثبت الطرف الآخر بأن نحصره بين مكعبين من الخشب مثلاً ونثبت الكعبين في حامل. نزيح البندول إزاحة جانبية صغيرة ونتركه ليهتز ونسجل زمن اهتزاز خمسين اهتزازة (ذبذبة) مثلاً بواسطة ساعة عادية أو ساعة إيقاف نقلل طول البندول مثلاً إلى أن يصبح 90 سم ونسجل زمن خمسين اهتزازة، ونكرر هذا العمل عند أطوال مختلفة وندون النتائج في الجدول الآتي:

طول البندول (ل)	زمن 50 اهتزازة	زمن الاهتزازة (الدور) ن	ن^2

دار جرير للنشر والتوزيع

نرسم علاقة بيانية بين $ن^2$ على محور ص، ل على محور س فنحصل على نقط. نرسم خط مستقيم يمر بمعظم هذه النقط ونحاول أن يتوسط الخط المستقيم النقط الأخرى التي لا تقع عليه. نوجد ميل هذا المستقيم فيكون مساوياً للمقدار $\frac{4ط^2}{جـ}$ وبالتالي نحسب جـ.

حدود الخطأ في هذه التجربة يجب ألا تتعدى 5٪.

ملاحظات:

يجب أن يكون الحامل المعلق منه البندول ثابتاً فلا يهتز معه وأن تكون حركة البندول في مستوى واحد رأسي ويستحسن ألا تتعدى سعة الاهتزاز الزاوية بضعة درجات.

المعادلة (1) يمكن تحويرها كالآتي:

$$ن = 2ط \sqrt{\frac{ل}{جـ}} = 2ط \sqrt{\frac{ك\ ل}{ك\ جـ}}$$

حيث ك كتلة الكرة.

$$\therefore ن = 2ط \sqrt{\frac{ك}{ك\ جـ / ل}} = 2ط \sqrt{\frac{ك}{ق_1}}$$

حيث $ق_1$ تمثل القوة المؤثرة عند وحدة الإزاحة.

وللتأكد من أن $\frac{ك\ جـ}{ل}$ تمثل القوة التي تؤثر على كرة البندول عندما تكون الإزاحة الجانبية للكرة هي الوحدة يرجع الطالب إلى طريقة برهان القانون (1) في الكتب النظرية(*) ويمكن إذن كتابة القانون (1) في صورة أخرى.

(*) كتاب خواص المادة للمؤلفين.

$$ن = 2\, ط \sqrt{\frac{\text{الكتلة المتحركة}}{\text{القوة لوحدة الإزاحة}}}$$

وضع قانون زمن الاهتزاز للبندول في هذه الصيغة يسهل تعميم هذا القانون في حالات أخرى مشابهة كما سيأتي في اهتزاز كرة معلقة في سلك زنبركي كما يمكن تحوير هذه القاعدة تحويراً بسيطاً لتنطبق على البندول المركب والمغناطيس المتذبذب.

المرونة:

تعريف:

إذا علق ثقل مناسب من طرف خيط من المطاط مثلاً ثم ترك ليتزن فإن الخيط تحدث له زيادة في الطول وإذا رفع هذا الثقل فإن الخيط يعود إلى طوله الأصلي عادة، مثل هذا الخيط يسمى خيطاً مرناً. والزيادة الحادثة في الطول تسمى استطالة ونفس الشيء يحدث إذا استخدمنا سلكاً زنبركياً بدلاً من الخيط المطاط أو سلكاً من الحديد مع استخدام أثقال مناسبة غير أن الزيادة في الطول تكون ضئيلة يحتاج قياسها إلى مقياس ميكرومتر أو القدمة ذات الورنية.

وبصفة عامة إذا أثرت قوة على جسم وأحدثت فيه تغييراً في الطول أو في الشكل مثلاً سمى هذا التغيير تشويهاً وعادة إذا رفعت هذه القوة زال التشويه الحادث، ويسمى مثل هذا الجسم الذي يزول عنه التشويه برفع القوة المؤثرة عليه بجسم مرن. والجسم التام المرونة هو الذي يستعيد حالته الأصلية تماماً بعد زوال القوة المؤثرة.

ويسمى التشويه لوحدة الأبعاد بالانفعال. والقوة المؤثرة على وحدة المساحات بالإجهاد والنسبة بين الإجهاد والانفعال تسمى معامل المرونة للمادة أي أن معامل

$$\text{المرونة} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}}.$$

فإذا كان الانفعال هو زيادة في الطول كما يحدث لسلك من الحديد مثلاً نتيجة تأثير قوة تؤثر في اتجاه الطول أي عمودياً على مقطع السلك فإن معامل المرونة الناتج

يسمى معامل المرونة الطولية أو معامل مرونة ينج Young فإذا كان طول السلك لـ والزيادة في الطول لَ نتيجة شده بقوة ق ومساحة مقطع السلك س فإن معامل المرونة الطولية ے يعطي بالعلاقة:

$$ے = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} = \frac{\text{القوى على وحدة المساحة من المقطع}}{\text{الزيادة في وحدة الطول}}$$

$$= \frac{\frac{ق}{س}}{\frac{ل}{لـ}}$$

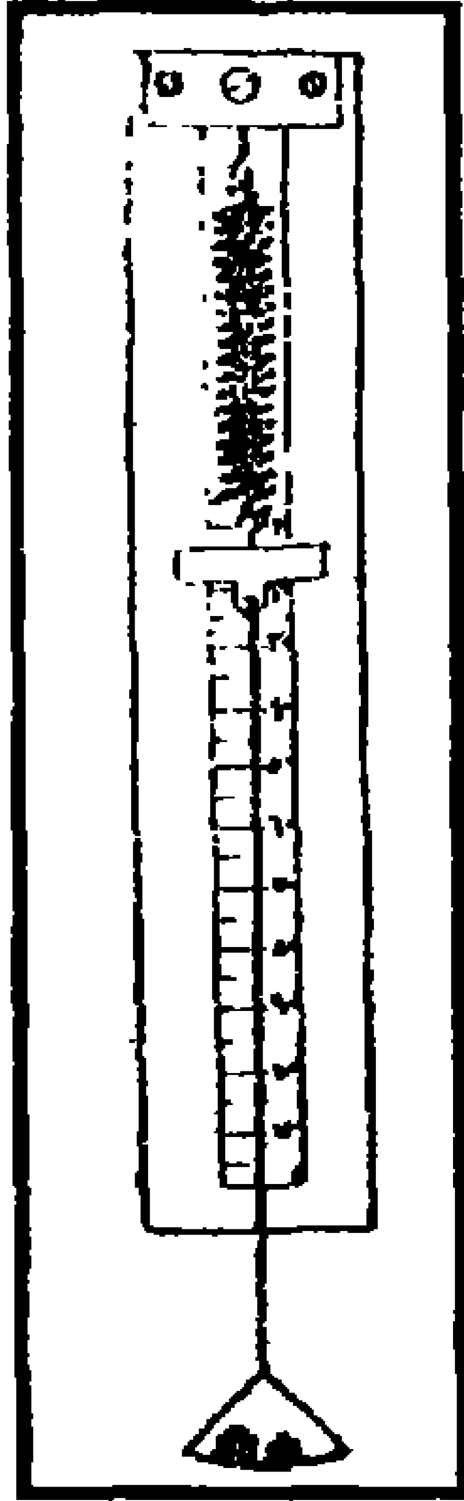
والنسبة بين الاجهاد والانفعال تكون ثابتة في حدود معينة وإذا زادت القوة المؤثرة عن حد معين فإن التناسب لا يظل صحيحاً. من المعادلة السابقة يمكن أن نكتب:

$$ق = \frac{ے \times س}{لـ} \times ل$$

تسمى القوة ق التي تعمل على استطالة سلك بالحمل أو الثقل، تعنى المعادلة السابقة أن الحمل يتناسب مع الاستطالة الحادثة ونسمى هذا القانون بقانون التناسب للجسم المرن (قانون هوك). ويلاحظ أن هذا القانون هو حالة خاصة من (1) وهو صحيح بشرط ألا يتعدى الجسم ما يسمى بحد التناسب وهذه القاعدة السابقة تنطبق على سلك من الصلب مثلا كما تنطبق على خيط من المطاط أو السلك زنبركي وثابت التناسب هنا يعبر عن القوة التي تحدث وحدة الاستطالة وهو باستبعاد حالة الزنبرك يساوي ے $\frac{س}{لـ}$.

تحقيق قانون التناسب في المرونة (قانون هوك) وتعيين ثابت التناسب لزنبرك:

خطوات العمل:


الشكل (2)

نستخدم جهازاً كما في شكل 2 عبارة عن زنبرك معلق من طرف نقطة ثابتة على حامل والطرف الثاني معلق به علامة معلق فيها كفة ميزان صغيرة، وهناك مقياس للأطوال كما في الشكل. نلاحظ التدريج الذي تشير إليه العلامة ونسجل القراءة التي يدل عليها التدريج، نضع ثقلا مناسباً مثلاً 5 جم في الكفة ونقرأ التدريج المقابل للعلامة ونكرر هذا العمل مع أوزان مختلفة 10 جم، 15 جم، ... الخ إلى أن نصل إلى حوالي 50 جم ثم نبدأ في رفع الأثقال عن الكفة بإنقاص 5 جم كل مرة وفي كل حالة نسجل القراءة اللازمة. تحسب الاستطالة في كل حالة ونكون جدولاً كالآتي:

الثقل ق	القراءة التي تدل عليها العلامة			الاستطالة ل
	عند زيادة الثقل لـ + ل	عند انقاص الثقل لـ + ل	متوسط القراءتين	
صفر 5 جم 10 جم 0 0				

نرسم العلاقة البيانية بين الحمل مقدراً بثقل الجرام على المحور الرأسي والاستطالة بالسنتيمتر على المحور الأفقي فإذا حصلنا على خط مستقيم فهذا يحقق صحة قانون التناسب في المرونة وفي هذه الحالة يمكن كتابة العلاقة:

$$ق = أ \times ل$$

من هذه المعادلة ينتج أن ميل الخط المستقيم أ = $\frac{ق}{ل}$ يمثل القوة اللازمة لإحداث استطالة قدرها الوحدة ويسمى هذا الثابت (أ) بثابت التناسب للزنبرك. وحدات هذا الثابت تعطى في هذه الحالة بثقل الجرام/ سم

وللحصول على قيمة الثابت بالداين/ سم يجب أن نضرب ميل الخط المستقيم × عجلة الجاذبية الأرضية.

أي أن أ = ميل الخط المستقيم بثقل الجرام/ سم

= ميل نفس الخط × حـ داين/ سم

اهتزاز كتلة معلقة في سلك زنبركي وإيجاد عجلة الجاذبية الأرضية حـ:

إذا علق جسم كتلته ك من سلك زنبركي كتلته كـ حدثت استطالة في الزنبرك. وإذا جذبت الكتلة إلى أسفل طولاً مناسباً بحيث لا نتخطى حد المرونة ثم تركت بعد ذلك فإنها تتذبذب إلى أعلى وإلى أسفل محدثة حركة توافقية بسيطة حول موضع الاتزان السابق ويمكن أن تطبق القاعدة المذكورة سابقاً فتكتب:

$$ن = 2\,ط \sqrt{\frac{ك}{\text{القوة لوحدة الإزاحة}}}$$

$$= 2\,ط \sqrt{\frac{ك}{أ}}$$

حيث أ ثابت التناسب للزنبرك وتكون المعادلة السابقة صحيحة إذا تغاضينا عن كتلة الزنبرك نفسه بالنسبة للكتلة المتحركة ك وإذا لم يكن من السهل إغفال كتلة الزنبرك بالنسبة إلى الكتلة المتحركة فإنه يلزم تصحيح المعادلة بحيث تصبح:

$$ن = 2\ ط \sqrt{\frac{ك + \frac{كـ}{3}}{أ}}$$

اي أن تأثير كتلة الزنبرك على زمن الذبذبة هو كما لو أضفنا كتلة قدرها $\frac{كـ}{3}$ للكتلة المتحركة عندما نستعمل زنبركاً عديم الوزن وتسمى الكتلة $\frac{كـ}{3}$ بالكتلة الفعالة للزنبرك وهي الكتلة التي تفعل فعلها في تغيير زمن الذبذبة. الثابت أ في هذه المعادلة يمكن الحصول عليه بتجربة اتزانية (استاتيكية) كالتي شرحت في البند السابق ولزيادة إيضاح هذه النقطة نقول أن الحمل ق = أ × ل حيث (ل) الاستطالة.

$$\therefore\ أ = \frac{ق}{ل}\ ثقل\ جم/\ سم = \frac{ك}{ل} \times حـ\ داين\ /\ سم$$

حيث ك الكتلة المعلقة فإذا أردنا التعبير عن ثابت الزنبرك بالواحدات المطلقة وهو ما يلزمنا عند استعمال المعادلة (1) فإننا نضرب الميل الذي نحصل عليه من التجربة الاستاتيكة السابقة في حـ أي = أ × حـ مثلاً

∴ المعادلة (1) يمكن كتابتها:

$$ن = 2\ ط \sqrt{\frac{ك + \frac{كـ}{3}}{أ \times حـ}} \qquad (2)$$

حيث أ هو ميل الخط المستقيم الذي نحصل عليه برسم علاقة بيانية بين الأثقال بالجرام والاستطالة بالسنتمير في تجربة إتزانية (استاتيكية) كما في التجربة السابقة. لتحقيق صحة المعادلة (2) واستخراج ثوابتها $\frac{ك}{3}$، حـ مثلاً نضعها في الصورة الآتية:

$$ن^2 = \frac{4ط^2}{أ حـ} (ك + \frac{ك}{3}) \qquad (3)$$

فإذا رسمنا علاقة بيانية بين مربع زمن الذبذبة ن2 على المحور الرأسي والكتلة المعلقة ك على المحور الأفقي فإننا نحصل على خط ميله $\frac{4ط^2}{أ حـ}$ ويقطع من المحور الأفقي طولا = $\frac{ك}{3}$ كما في شكل (3) وبذلك يمكننا حساب عجلة الجاذبية إذا عرفت أ وكذلك إثبات أن الكتلة الفعالة للزنبرك تساوي ثلث كتلته.

خطوات العمل:

نبدأ بعمل تجربة إستاتيكية كالسابقة فنوجد الاستطالة ل المقابلة للحمل ق باستخدام أثقال مختلفة. نرسم رسماً بيانياً بين الحمل بثقل الجرام على المحور الرأسي والاستطالة بالسنتيمتر على المحور الأفقي ميل هذا الخط البياني هو أ في المعادلة (3).

نجري بعد ذلك التجربة الحركية (الديناميكية) فنعلق أثقالاً (5 جم، 10 جم، 15 جم، ...) على التتابع وفي كل حالة نجذب الكتلة إلى أسفل قليلاً ثم نتركها لتتذبذب ونسجل زمن عشرين أو خمسين ذبذبة إذا أمكن ونكرر هذا العمل إلى أن نصل إلى 50 جم مثلاً مع ملاحظة ألا يخرج الزنبرك على حد المرونة. نرفع الأوزان مرة أخرى بالتتابع فننقص 5 جم في كل مرة وفي كل حالة نوجد زمن 50 ذبذبة. نحسب زمن الذبذبة (الدور) في كل حالة ونسجل النتائج في جدول كالآتي:

الكتلة ك	زمن 50 ذبذبة		متوسط زمن الذبذبة ن	ن2
	عند تزايد الكتل	عند التناقص		
5 جم 10 جم 0 0				

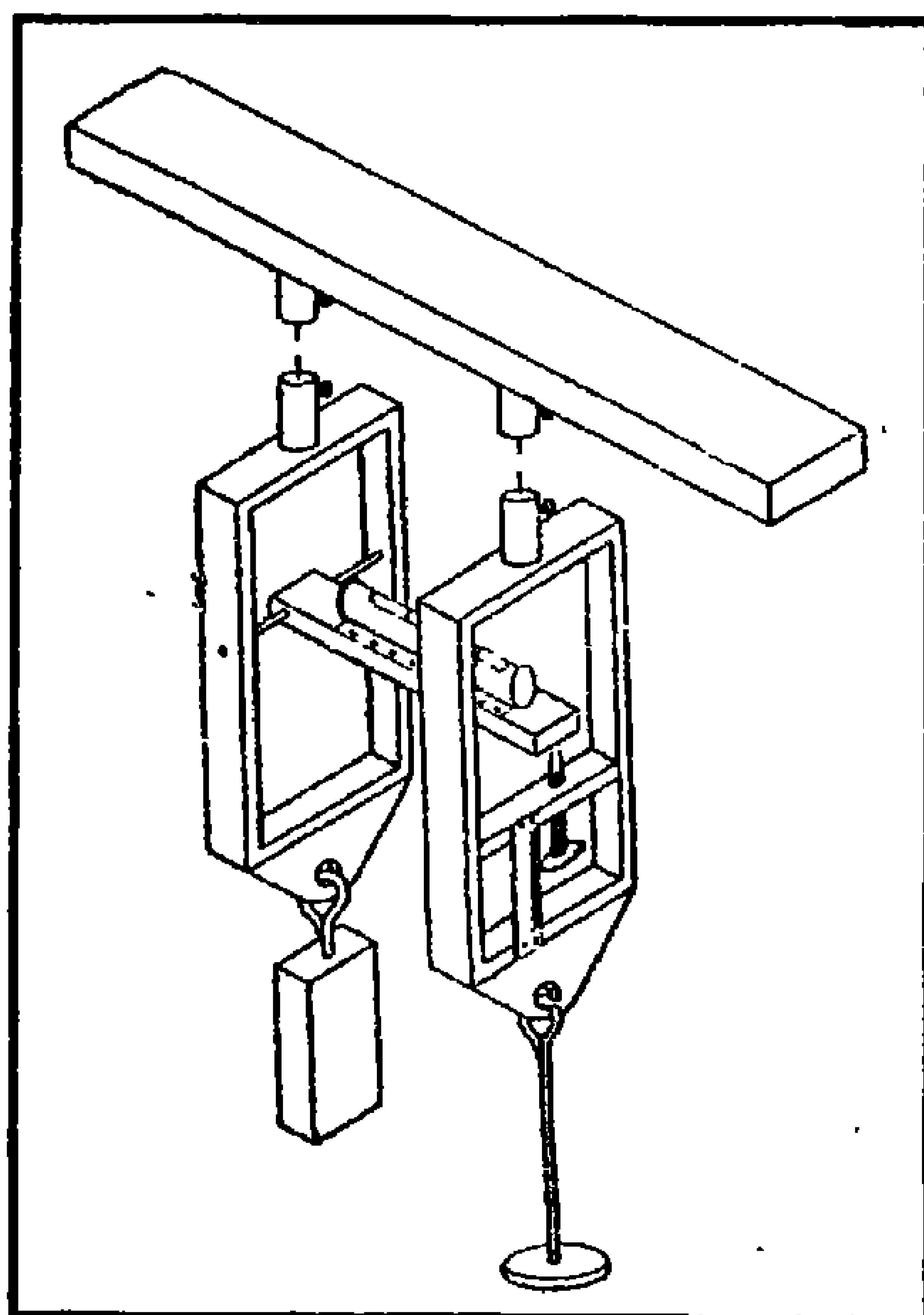
نرسم خطاً بيانياً بين ن2 على المحور الرأسي، ك على المحور الأفقي فإذا حصلنا على خط مستقيم فهذا يحقق المعادلة (2) أو (1) ميل هذا الخط هو $\frac{4ط^2}{أ حـ}$ والجزء الذي يقطعه من محور س يمثل الكتلة الفعالة للزنبرك. بالتعويض عن أ من النتيجة التي حصلنا عليها في المعادلة (3) نحصل على كتلة الزنبرك ويمكننا التحقيق من ذلك بوزن الزنبرك.

تعيين معامل المرونة الطولية (معامل يتنج) لمادة سلك:

تجربة:

يستخدم لإيجاد معامل المرونة الطولية جهاز كالمبين بشكل (4) ويتكون من سلكين متجاورين مثبتين في عاتق من الحديد مثبت جيداً في الحائط أو المعمل. أحد السلكين من المادة المراد إيجاد معامل مرونتها والسلك الثاني للمقارنة. ومربوط بكل من السلكين إطار كالمبين بالشكل وينتهي الإطار المتصل بسلك المقارنة بثقل ثابت وينتهي الآخر بحامل للأثقال يمكن وضع أثقال عليه حسب الحاجة ويصل بين الإطارين ميزان تسوية مائي مثبت من جهة بالإطار المعلق بسلك المقارنة تثبيتاً محورياً بحيث يسهل للطرف الآخر لميزان التسوية أن يعلو أو ينخفض وهذا الطرف الآخر يرتكز على مسمار محوى عبارة عن مقياس حلزوني دقق (ميكرومتر) وبواسطة إدارة

رأس المقياس الحلزوني يمكن ضبط ميزان التسوية. نضبط ميزان التسوية في حالة عـدم وجود أثقال بالحامل المعلق بالسلك المراد إيجاد معامل المرونة الطولية له.



الشكل 3

خطوات العمل:

نضبط المقياس الحلزوني بحيث تكون الفقاعة الهوائيـة لميـزان التسـوية في الوسـط وبذا يكون ميزان التسوية في وضع أفقي نقرأ المقياس الحلزوني في هـذا الوضـع نضـع ثقلاً وليكن $\frac{1}{2}$ كجم في الحامل فنشاهد أن ميزان التسوية يميل دالاً علـى هبـوط طرفـه الحر نتيجة شد الأثقال للسلك. نعيـد ميـزان التسـوية إلى الوضـع الأفقـي بالاسـتعانة بالمقياس الحلزوني، ونقرأ القراءة الجديدة للمقياس والفرق بين القراءتين يعطى الزيادة التي حدثت في طول السلك أي الاستطالة. نكـرر هـذا العمـل بوضـع 1 كجـم، $1\frac{1}{2}$ كجم وهكذا ونحسب الاستطالة في كل حالة. ندون القراءات في جدول كالآتي:

الحمل ق	الاستطالة عند تزايد الأثقال	الاستطالة عند تناقص الأثقال	متوسط الاستطالة ل
$\frac{1}{2}$ كجم			
1 كجم			
000			
000			

نرسم خطاً بيانياً يبين الحمل بالداين (1 جم = 981 داين) على محور ص والاستطالة بالسنتيمتر على محور س.

من تعريف معامل المرونة الطويلة

$$\text{ے} = \frac{\frac{\text{ق}}{\text{س}}}{\frac{\text{ل}}{\text{لـ}}}$$

حيث س مساحة المقطع، ل الطول الأصلي للسلك

$$\therefore \text{ق} = \frac{\text{ے س}}{\text{لـ}} \times \text{ل}$$

فالحصول على خط مستقيم من التجربة يحقق التناسب بين الإجهاد والانفعال ويكون ميل هذا الخط المستقيم مساوياً $\frac{\text{ے س}}{\text{لـ}}$ نقيس قطر السلك في مواضع مختلفة منه ونأخذ المتوسط ونحسب مساحة المقطع بالسنتيمتر المربع ونقيس الطول الكلي للسلك بالسنتمتر وبالتعويض نحصل على قيمة معامل المرونة الطولية بالوحدات المطلقة.

الخطأ المحتمل في النتيجة كبير نسبياً ولا يزيد عن 10 ٪.

الفصل الثامن

التعامل مع شعاع الليزر في المختبر والحقل

الفصل الثامن

التعامل مع شعاع الليزر في المختبر والحقل

نعلم جيداً مدى خطورة شعاع الليزر على الجسم والعين خاصة. وخطورته هذه تكمن في أهم خاصيتين فيه هما:

1. يمكن لشعاع الليزر أن يقطع مسافات بعيدة دون أن تقل شدته حيث يسير بخط مستقيم دون أن يحدث انفراجاً في حزمته.
2. شدة الإضاءة العالية للشعاع.

تأثير الشعاع يقع أساساً على العين، أما على الجلد فلا يتعدى الحروق للمنطقة المصابة حيث أن تأثيره في العين يكون كبيراً جداً ولغرض توضيح ذلك نقارن شعاع ليزر ذا قدرة (1 ملي واط) مع مصباح ضوئي ذي قدرة (100 واط) ونلاحظ مدى تأثير شعاع الليزر نسبة لتأثير المصباح الشكل (1) يوضح مقطعاً للعين تصور مصباحاً اعتيادياً وشعاع ليزر ولحساب كثافة القدرة عند القزحية والمساحة المعرضة للأشعة على الشبكية. قطر الصورة على الشبكة (ق ش) يمكن حسابها من المعالة التالية:

ق ش = ق ب / م

حيث أن (ق) هو قطر الجسم و (ب) هو البعد البؤري لعدسة العين الذي يكون بحدود (17 ملمتراً) للعين الاعتيادية و (م) هو بعد الجسم عن العين.

كثافة القدرة على الشبكية ($ش_ش$) يمكن حسابها من المعادلة التالية:

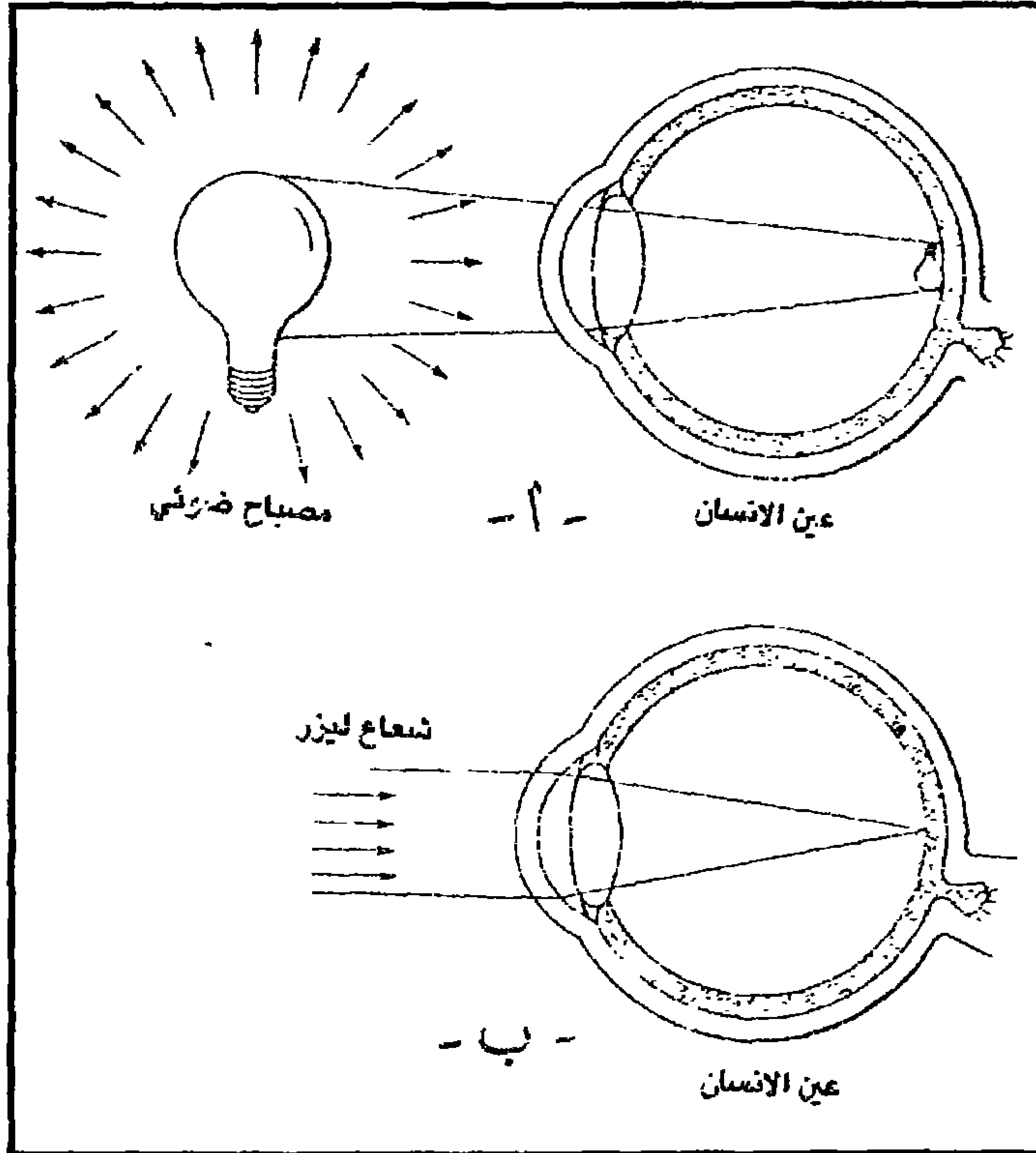
$$ش_ش = ش_ق \times \frac{ق_ق^2}{ق_ش^2}$$

حيث أن (شق) هي كثافة القدرة على القرنية (قق) هو قطر القزحية (بافتراض بأن بؤبؤ العين مفتوحاً على سعته وبذلك فإن قطره يساوي قطر القزحية).

نفرض بأن قطر المصباح هو (8 سم) ويشع ضياؤه بصورة متجانسة بقدرة (10 واط) في المدى المرئي للأشعة. وبعده عن العين هو (50 سم). فإن:

شش = 2.1 ملي واط / سم

أما بالنسبة لشعاع الليزر فإنه يركز بواسطة عدسة العين الطبيعية على شكل نقطة صغيرة جداً وهذه هي أهم مخاطر شعاع الليزر والتي تسبب تلف الشبكية، إن قطر هذه النقطة يعتمد على عدسة العين.



الشكل (1)

العين وهي تصور أ. مصباح ضوئي ب. شعاع ليزر

قش = 1.27 ل ب/ ق (بالنسبة لشعاع ضوئي متواز كشعاع الليزر)

حيث إن (ل) هو الطول الموجي لشعاع الليزر و (ق) هنا تمثل قطر الشعاع فإذا ما استخدمنا ليزراً ذا قدرة (1 ملي واط) فإن المعادلة تكون على الوجه التالية:

شش = 16 × 10 2 واط / سم

من هذا نلاحظ أن شعاع الليزر ذا قدرة (واحد ملي واط) يعطي كثافة قدرة على الشبكية عشرات آلاف الأضعاف من قدرة مصباح ذي (100 واط).

في المثال السابق افترضنا بأن الطول الموجي للشعاع يقع في المدى الذي ينفذ من خلال عدسة العين إذ لا تنفذ جميع الأطوال الموجية فهناك أطوال موجية معينة تمتص وتؤدي إلى حروق في القرنية والعدسة، وهناك أطوال موجية أخرى تعبر خلال العين ككل دون أن تتأثر بالعدسة. ويعطي الشكل (2) لنا فكرة عن مديات الأشعة الكهرومغناطيسية النافذة والمنعكسة والممتصة من قبل العين.

قرنية العين تعامل كالجلد ولكن الشبك لها معاملتها الخاصة حيث أن عدسة العين تركز الشعاع عليها وبذلك تزيد من كثافته بحدود عشرة آلاف مرة والجدول (1) يوضح لنا أعلى قدرة يمكن للعين أن تتحملها وتسمى هذه "بحد العتبة".

مخاطر الليزر:

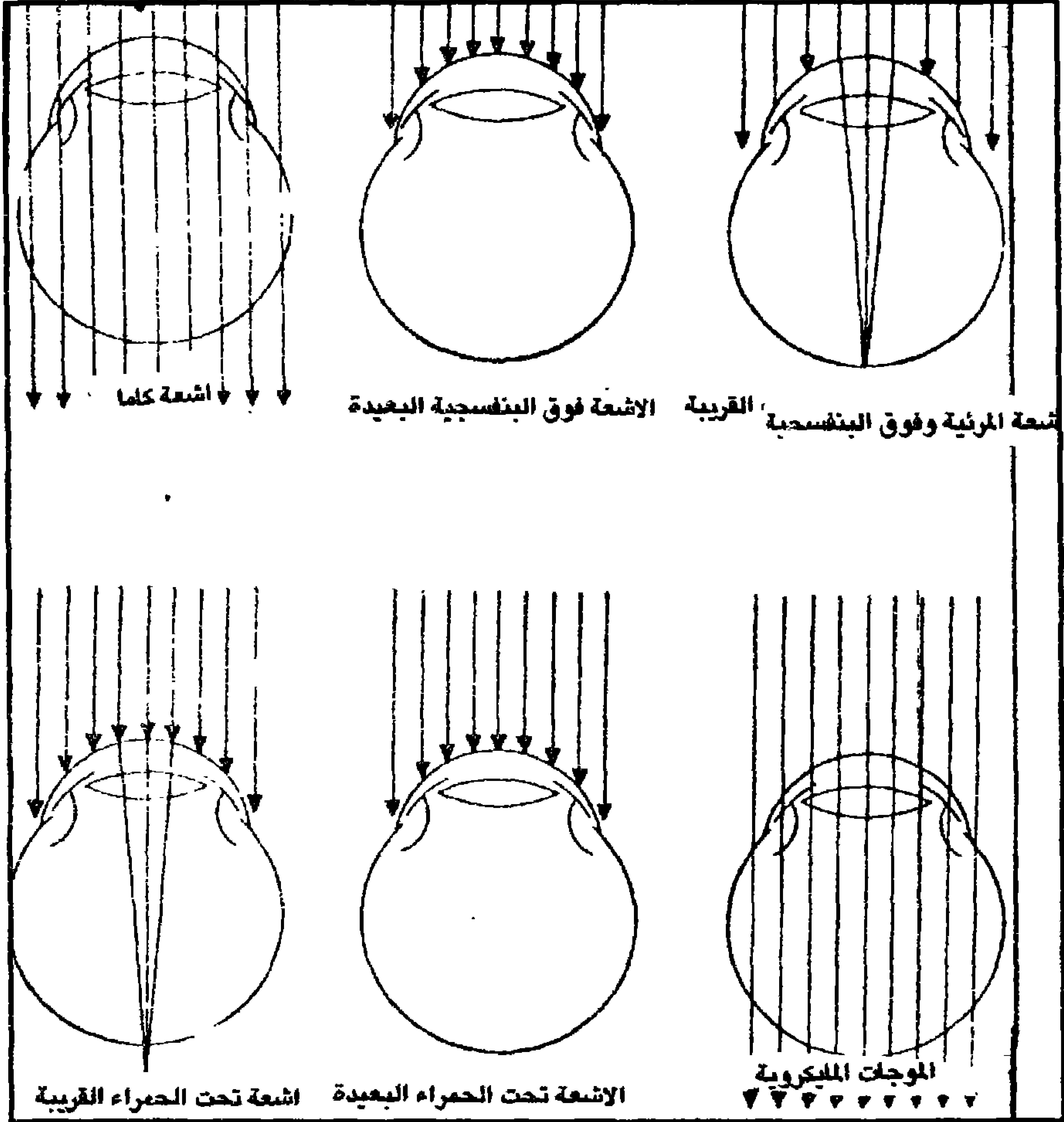
لا تكمن مخاطر الليزر فقط في شعاعه بل أن هناك العديد من المخاطر التي قد يتعرض لها الشخص العامل في حقل الليزر ومن أهمها:

1. المخاطر الكهربائية نتيجة وجود المتسعات الكبيرة وفرق الجهد العالي جداً.
2. مخاطر المواد الكيماوية المستخدمة في الليزر.
3. مخاطر الأبخرة والغازات الناتجة من تعرض بعض المواد لشعاع الليزرة.
4. مخاطر الحريق نتيجة التفريغ الكهربائي.

5. مخاطر السوائل المبردة (النايتروجين السائل والهليوم السائل).

6. مخاطر الأوزون المتولد نتيجة الشرارة الكهربائية.

7. مخاطر الأشعة المتولدة من مقومات الموجة الكهربائية (البلورات الثنائية الخاصة بالجهد العالي).



الشكل 2

الأطوال الموجية النافذة والممتصة من قبل العين

برنامج الحماية:

المخاطر التي ذكرناها سابقاً تتطلب وجود برنامج حماية يوفر السلام الكافية للعاملين في حقل الليزر.

ولغرض السيطرة على شعاع الليزر يجب أن نحدد.

أولاً: طبيعة عمل الليزر فيما إذا كان جزءاً من منظومة متكاملة أو مستقلاً، وبالدقة يجب أن نعرف الأمور التالية لغرض وضع برنامج الحماية.

1) نوع الاستخدام لليزر (صناعي، طبي، دراسي... الخ).

2) نوع الليزر (نبضي، مستمر، ذو قدرة واطئة، ذو قدرة عالية).

3) مكان العمل (مختبر، مصنع، حقل.. الخ).

4) كمية الطاقة الكهربائية التي نحتاج إليها.

5) مدى الحاجة إلى التهوية.

6) مدى الحاجة إلى الماء للتبريد.

7) نوع العاملين (مهندسين، باحثين، فنيين وعمال.. الخ).

8) نوع التغليف للمنظومة.

أ. منظومة مغلفة (لا يمكن رؤية شعاع الليزر إطلاقاً) وذلك باستخدام حواجز أمان وإقفال بحيث يتوقف الجهاز عن العمل عند إزالة الحاجز.

ب. منظومة مكشوفة.

9) نوع سوائل التبريد.

10) وجود مواد قابلة للانفجار.

11) احتمال وجود الشرارة الكهربائية التي تولد الأوزون.

12) وجود مصابيح ذات قدرة إضاءة عالية.

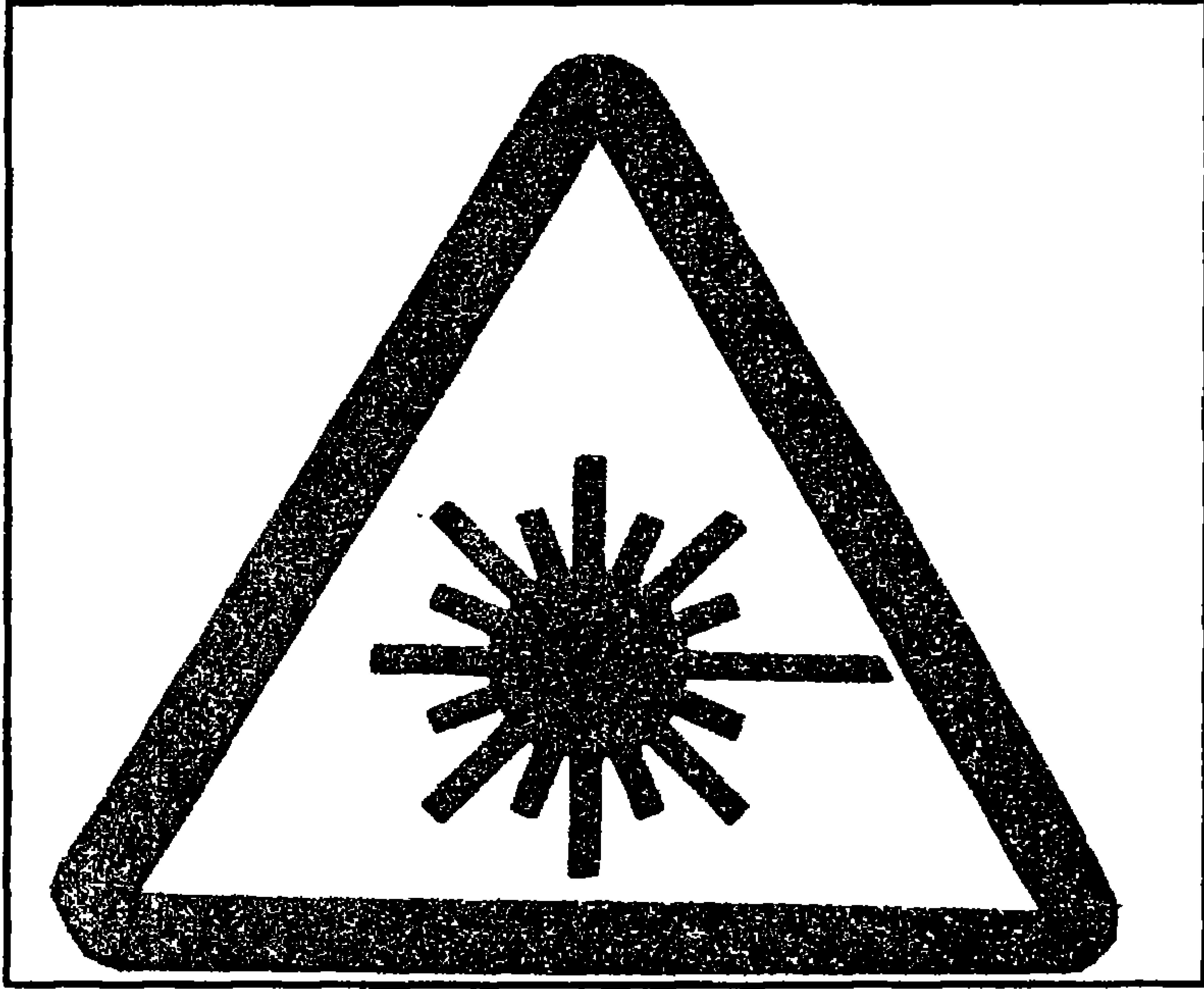
كل هذه الأمور يجب أن يحسب حسابها عند استخدام ليزر معين لغرض تهيئة المكان المناسب له.

استخدام الليزر داخل المختبر:

يخضع استخدام الليزر إلى عدة ضوابط أهمها:

1) يجب أن تستخدم الليزرات في المختبر فقط أو في الأماكن المخصصة لها والتي يمكن السيطرة على مخاطرها.

2) الأماكن التي يوجد فيها ليزر يجب أن تعلم بوضوح بالعلامة الدولية الخاصة بأشعة الليزر (شكل 3).



شكل 3

علامة الخطر الخاصة بأشعة الليزر

3) في الأماكن التي تستخدم فيها ليزرات نبضية ذات قدرة عالية يجب أن تجهز هذه الأماكن بأبواب أمان ترتبط مع الليزر بحيث، يتوقف الليزر عن العمل حال فتحها.

4) يستخدم ليزر واحد قدر الإمكان في المكان الواحد وفي الوقت نفسه.

5) تغلق الشبابيك في الأماكن التي يستخدم فيها الليزر وتطلى بلون أسود للحيلولة دون خروج شعاع بصورة عفوية.

6) يضاء المختبر جيداً وتصبغ الجدران والسقوف باللون الأبيض غير اللماع ليعطي إضاءة كافية بحيث تجعل بؤبؤ العين أصغر ما يمكن.

7) ترفع الأجهزة غير الضرورية في المختبر قد الإمكان وكذلك الأشياء العاكسة وتستخدم دواليب ذات أبواب معدنية (وليست زجاجية) مطلية للحيلولة دون انعكاس الشعاع منها.

8) توفير التهوية المناسبة في المختبر.

9) تثبيت الليزر على المنضدة جيداً للحيلولة دون حركته المفاجئة.

10) استخدام النظارات الخاصة بالليزر.

استخدام الليزر في الحقل:

إن استخدام الليزر خارج المختبر يخضع للعديد من القوانين إضافة لما ورد سابقاً، ذلك لاحتمال تعرض أشخاص آخرين ليس لهم علاقة بالموضوع للشعاع، لذلك تمنع بعض الدول مثل ألمانيا الاتحادية استخدام الليزر خارج المختبر بتاتاً، واستخدام الليزر في الحقل يستوجب أن تعلم المنطقة جيداً وتحدد ذلك من مسافات بعيدة للحيلولة دون دخول الأشخاص لها، ويجب أن نستحصل الموافقات من الجهات الإدارية التي تخضع المنطقة لسلطتها الإدارية عند العمل.

ومن الأمور المهمة التي يجب معرفتها عند التعامل مع شعاع الليزر هو مدى الرؤياء السليم Safe Viewing Distance وتختصر بـ S.V.D (م). والذي يكون شعاع الليزر المباشر والمنعكس غير مؤثر في العين أي أن شدته تقل عن الحد المسموح به.

1. بالنسبة للشعاع المباشر:

$$1.13\sqrt{\left(\frac{\text{تص}\times\text{ش}}{\text{ش}_{\text{د}}}\right)} - (\text{ق}_{\text{ل}} \times 10^{-3}) \div \text{هـ}$$

2. أما بالنسبة للشعاع المنعكس من مرآة:

$$1.13\sqrt{\left(\frac{\text{تص}\times\text{ش}}{\text{ش}_{\text{د}}}\right)} - \text{ق}_{\text{ل}} \times 10^{-3} - \text{م}_{1} \times 10^{-3} \div \text{هـ}$$

ج. وبالنسبة للشعاع المنعكس من جسم مشتت للأشعة:

$$\text{م} = 0.56 \times \frac{\text{ش}\times\text{تص}\times\text{مع}}{\text{ش}_{\text{د}}} \text{ متر}$$

حيث إن (ش) هي شدة أشعة الليزر (تص) امتصاص الشعاع خلال مروره في الجو و (ش ق) أعلى حد مسموح به لتعرض القرنية و ($\text{ق}_{\text{ل}}$) قطر شعاع الليزر و (هـ) زاوية انفراج الشعاع و (م_{1}) بعد المرآة عن الجهاز الليزر و (مع) هي انعكاسية السطح العاكس. وتستخدم نظارات خاصة تعمل عمل المرشح تمتص الأشعة الساقطة عليها والنظارات المستخدمة على نوعين الأول نظارات خاصة بكل طول موجي حيث لا تمرر الطول الموجي المعين وتمرر بقية الأطوال فإذا ما استخدمناها يمكن لنا من خلالها رؤية ما حولنا ما عدا شعاع الليزر وهذه النظارات تكون معلمة بنوع الليزر حيث نلاحظ بأنه يكتب عليها هليوم – نيون، ياقوت، ثاني أوكسيد الكاربون... الخ.

وهناك نوع آخر من النظارات التي تستخدم زجاجاً يمتص الأطوال الموجية كافة بنفس النسبة تقريباً وتسمى بالمرشحات الطبيعية Natural Density Filter أو

المرشحات ذات الامتصاص المتجانس وتختلف من نوع إلى آخر حسب نسبة الأشعة التي تمررها ويمكن حساب كثافة امتصاص المرشح (ك م) من المعادلة التالية:

$$\text{ك م} = \text{لوغارتم} \frac{\text{شدة الشعاع عند العين}}{\text{ش ق}}$$

وبصورة عامة يضاف (1) إلى (ك م) لزيادة السلامة مثلاً إذا كانت (ك م) المحسوبة هي (5) فإنه يستخدم مرشح ذو كثافة امتصاص تساوي (6).

الفحص الطبي:

يجب على العاملين في حقل الليزر أن يخضعوا إلى فحوصات طبية معينة.

1. الفحص الأولي، يجب أن يجري فحص أولي للعين بالنسبة للعاملين قبل بدء العمل.
2. الفحص الدوري للعين كل ستة أشهر.
3. الفحص عند حدوث حادث معين وتعرض العين للإشعاع.

جدول 1

أعلى حد مسموح به لتعرض القرنية

نوع الليزر نبضي/ لكل نبضة

نبضة قصيرة $10^{-4} - 10^{-6}$

نوع الليزر	نبضي/ لكل نبضة		
	نبضة قصيرة	نبضة طويلة	
	$10^{-9} - 10^{-6}$ ثا	$10^{-6} - 10^{-1}$ ثا	
	جول/ م^2 2	جول/ م^2	واط/ م^2
ياقوت	1.6×10^{2}	5.2×10^{3}	1.8×10^{3}
نيوديوم	9.4×10^{2}	1.5×10^{4}	10^{4}
هليوم/ نيون			1.5×10^{3}
اركون			1.5×10^{3}
أعلى حد مسموح به لتعرض الشبكية			
ياقوت	3×10^{4}	10^{2}	4×10^{3}
نيوديوم	3×10^{3}	3×10^{2}	2×20^{3}
هليوم / نيون			3×10^{3}
اركون			3×10^{3}

الفصل التاسع

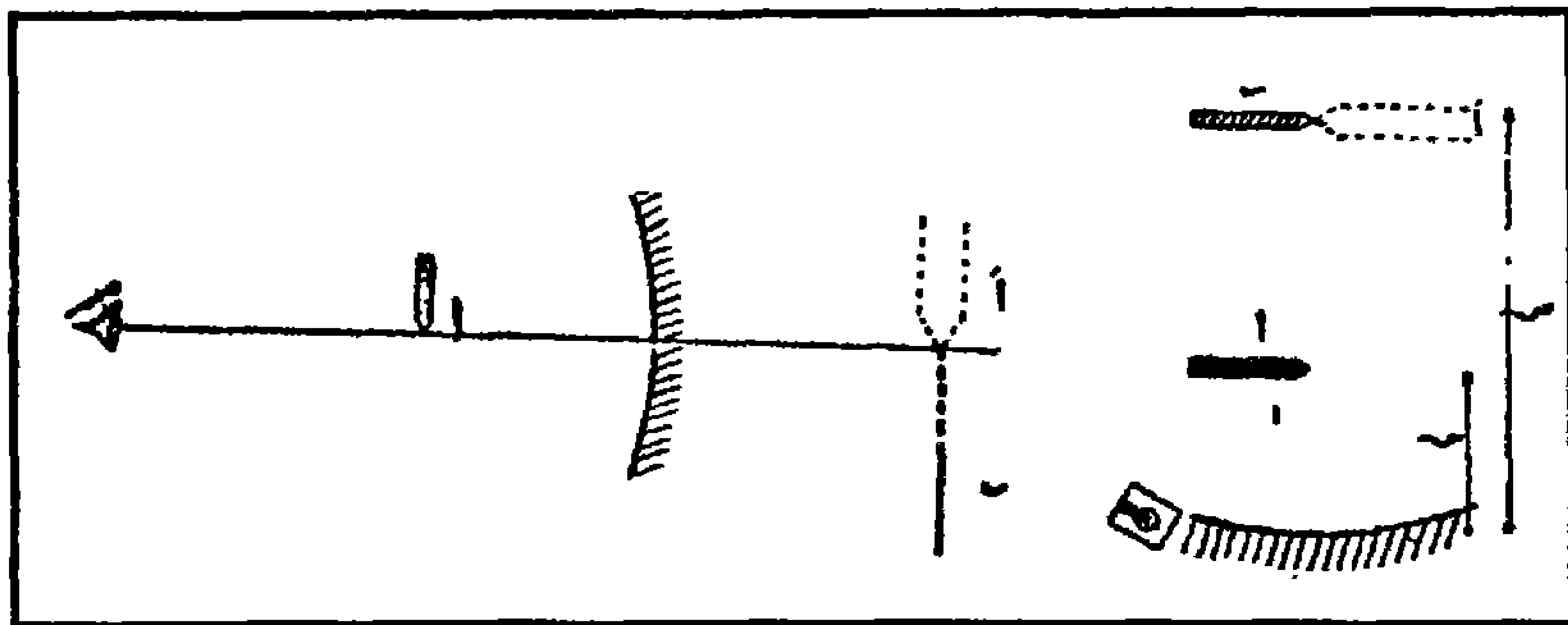
المرايا والعدسات

الفصل التاسع

المرايا والعدسات

إيجاد قوة المرآة المقعرة باستخدام انطباق المواضع:

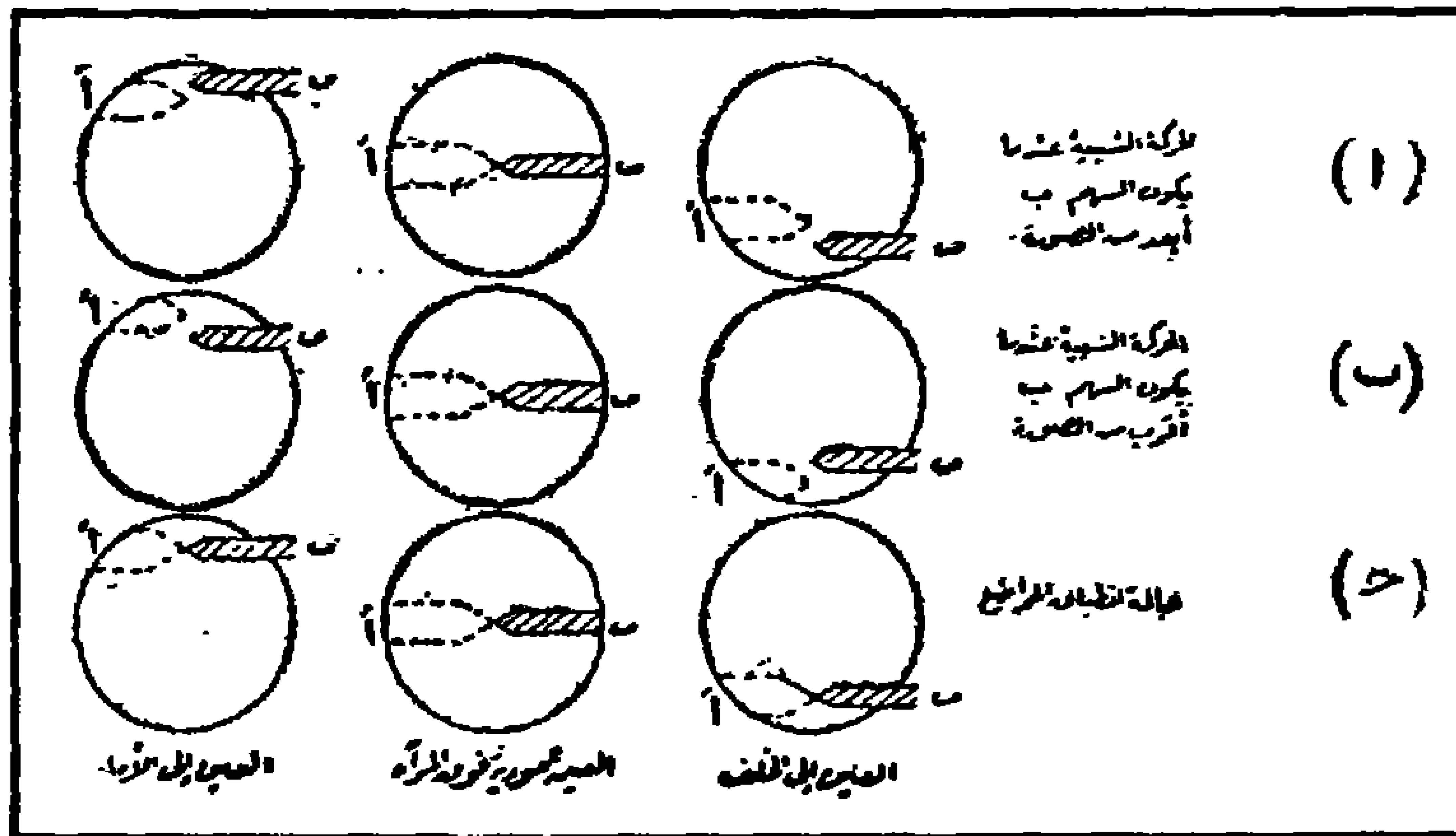
يحتاج الأمر في كثير من التجارب إلى تحديد موضع الصورة بطريقة أخرى غير طريقة الحاجز ونستعمل لذلك طريقة انطباق المواضع أو إنعدام التغيير في الوضع الظاهري. لاستخدام هذه الطريقة للحصول على موضع الصورة الحادثة في المرآة نجري الآتي:



الشكل (1) الشكل (2)

نضع المرآة المقعرة أفقية على المنضدة كما في الشكل (1) ونضع فوقها سهما أ قريباً من المرآة بحيث يكون رأس السهم على العمود المقام عند قطب المرآة ونحاول أن نرى صورة السهم أ ويساعد على رؤية الصورة إضاءة الجسم أ من الجهة التي بها المرآة باستخدام صندوق ضوئي كما هو مبين بالشكل وذلك مع حجب الضوء عن العين. نحضر سهما آخر ب ونضعه موازياً للسهم أ فوق السهم الأول ونجعل رأسه أيضاً على العمود المقام عند قطب المرآة. ننظر من أعلى في اتجاه عمودي فوق المرآة بحيث نرى

رأس السهم ب تنطبق على رأس الصورة أ. نحرك العين إلى الأمام وإلى الخلف قليلاً في اتجاه عمودي على اتجاه السهمين، إذا لاحظنا وجود حركة نسبية بين أ، ب، فمعنى هذا أن السهم ب غير منطبق على الصورة فإذا كانت الحركة النسبية للسهم ب أكبر قليلاً من الحركة النسبية للصورة كما يوضح ذلك (الشكل 3 أ) فمعنى ذلك أن السهم ب أبعد عن العين من الصورة أ لذا يلزم تحريك السهم إلى أعلى. إذا حركنا العين بعد ذلك ولاحظنا أن الحركة النسبية للسهم أقل كما في (شكل 3 ب) فيلزم إرجاع السهم قليلاً حتى لا تحدث حركة نسبية بين السهم والصورة ويتحركان معاً كما في (شكل 3 ج) وفي هذه الحالة يكون بعد السهم عن المرآة هو بعد الصورة نبعد السهم أ عن المرآة قليلاً ونوجد موضع الصورة بالكيفية السابقة ونكرر العمل في مواضع مختلفة إلى أن تصل أ إلى مركز التكور وعندها لا يكون هناك حاجة إلى الآخر ب ونكتفي بأن نحاول أن نحصل على انطباق في المواضع بين السهم وصورته، إذا استمررنا بعد ذلك في إبعاده عن المرآة فإن السهم ب يجب وضعه أسفل أ ونلاحظ دائماً أن تكون العين على بعد كافٍ من المرآة بحيث يمكن رؤية كل من أ، ب، أ.



الشكل 3

يمكن تكرار العمل مع وضع الجسم أ على بعد أقل قليلاً من البعد البؤري المرآة ونحاول أن نوجد الصورة بطريقة انطباق المواضع فنعثر عليها أسفل المرآة على بعد

دار جرير للنشر والتوزيع

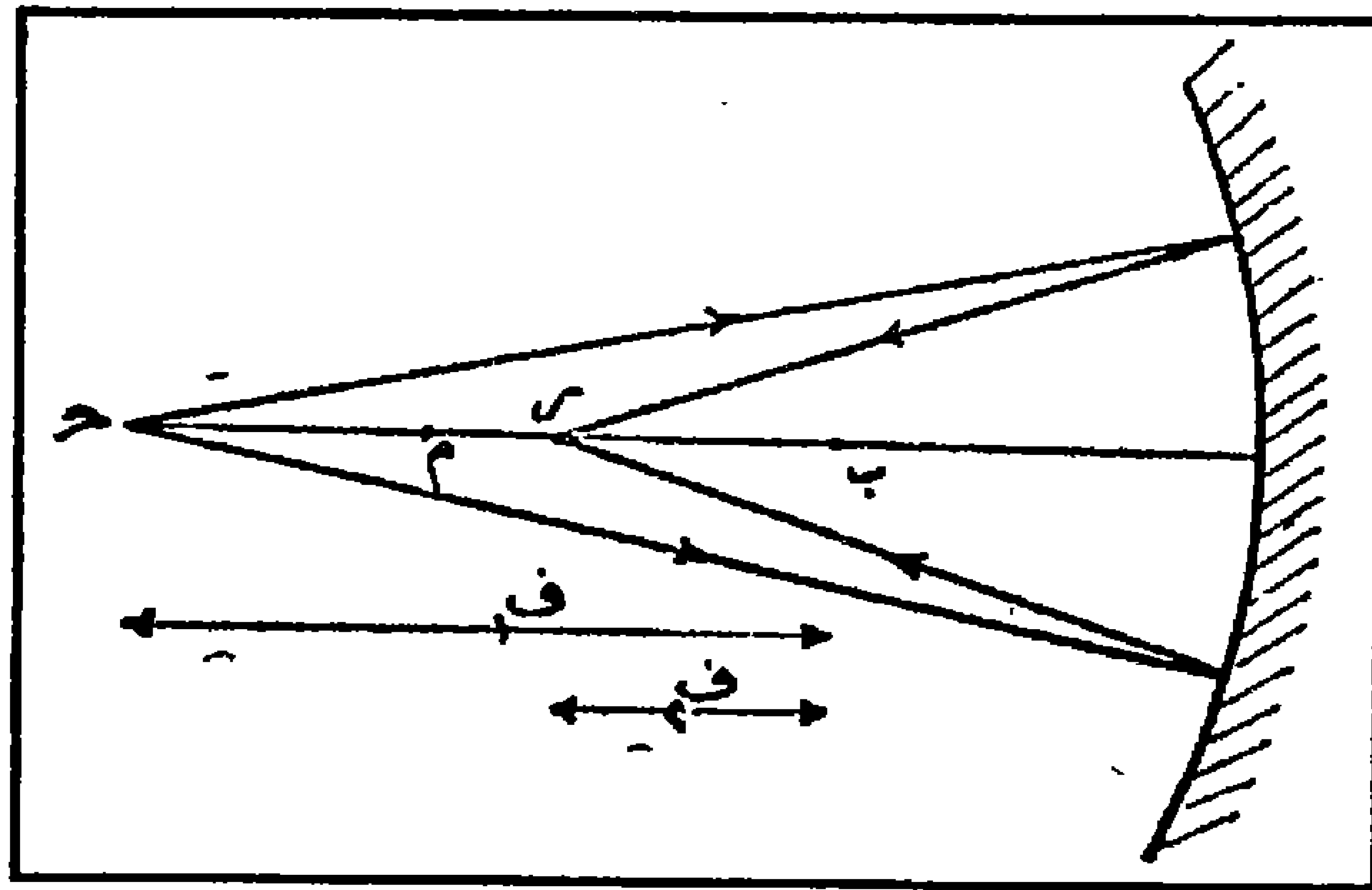
منها وتكون معتدلة ولتسهيل العمل في هذه الحالة نضع المرآة في وضع رأسي ونحرك السهم في الاتجاه الأفقي كما في (شكل 4 ب) مع استبدال السهم ب بإبرة رفيعة طويلة لأنه إذا استعمل السهم فإن رأسه ستختفي خلف المرآة فيصعب تحديد موضع رأس السهم ولكن استعمال الإبرة الرفيعة يسهل هذه العملية.

نقرب الجسم أ تدريجياً من المرآة وفي كل حالة نحدد موضع الصورة وندون النتائج ونرسم خطاً بيانياً كما في البند السابق لنحصل على عَ أو ع.

استخدم قاعدة بعدي الجسم والصورة عن البؤرة لإيجاد البعد البؤري (قاعدة نيوتن):

نظرية التجربة:

إذا تكونت صورة حقيقة لجسم أمام مرآة مقعرة وكان بعد الجسم حـ عن البؤرة هو ف1 وبعد الصورة ب عن البؤرة هو ف2 فإن البعد البؤري ع يعطي بالمعادلة ع2 = ف1 ف2.



الشكل (4)

خطوات العمل:

نضع المرآة على المنضدة الضوئية ونعين موضع بؤرتها بطرية الجسم البعيد مثلاً. نضع الجسم أمام المرآة على بعد كبير نسبياً ونوجد الصورة على حائل. نقيس بعد الجسم عن البؤرة ف1 وبعد الصورة عن البؤرة ف2 وندون النتائج. نقرب الجسم قليلاً ونعين ف1، ف2 ثانياً نكرر ما سبق بتغيير المسافة ف1 وفي كل حالة نوجد ف2.

القراءات:

بعد الجسم عن البؤرة ف1	بعد الصورة عن البؤرة ف2	ع = $\sqrt{ف2 \; ف1}$

∴ البعد البؤري =

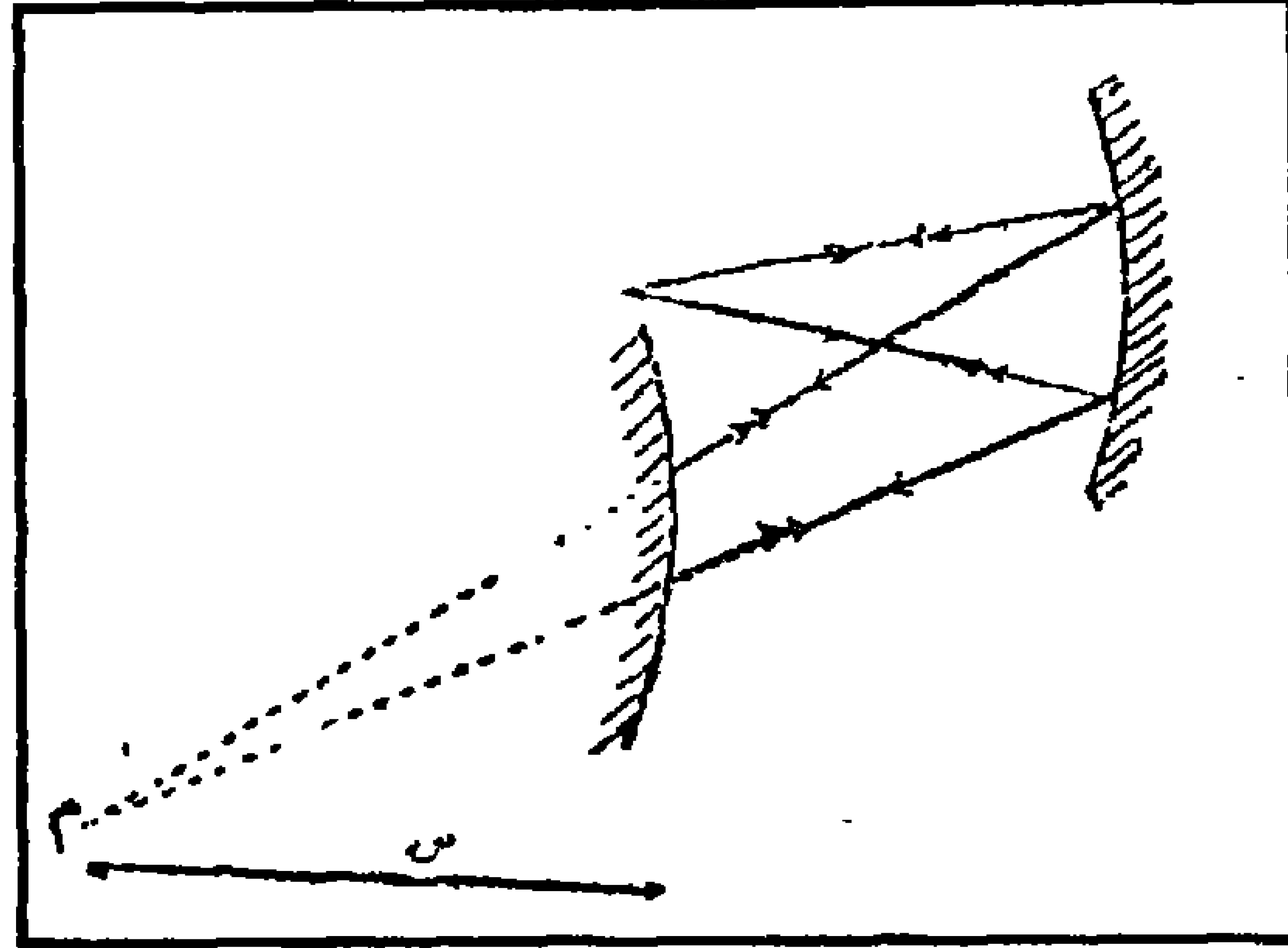
ملحوظة:

تمتاز هذه الطريقة عن الطرق السابقة عندما يكون القياس ابتداء من قطب العدسة متعذراً كأن تكون المرآة داخل جهاز مثلاً ففي هذه الحالة يكفي تحديد البؤرة بطريقة الجسم البعيد مثلاً فنحصل على نقطة خارج الجاهز يمكن يد القياس منها.

إيجاد قوة مرآة محدبة بانطباق الصورة والجسم واستخدام مرآة مجمعة:

فكرة هذه التجربة كالسابقة، نجعل الأشعة الساقطة من جسم حـ تتجمع في نقطة مثل م بعد إنعكاسها من مرآة مجمعة. نضع المرآة المحدبة في طريق الأشعة ونحركها بحيث

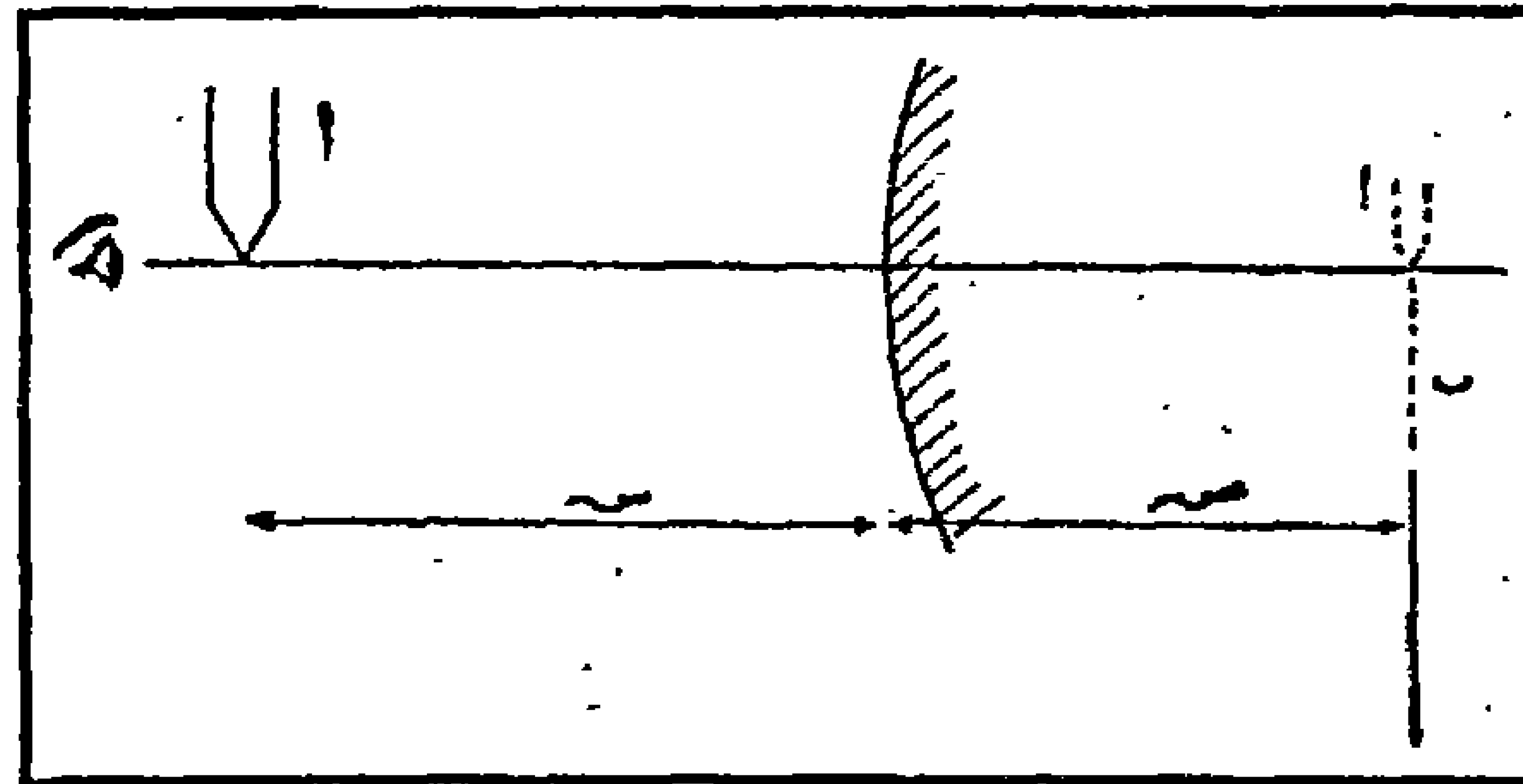
تنطبق الصورة على الجسم فتكون الأشعة الساقطة على المرآة المحدبة عمودية على سطحها أي أن نقطة إلتقاؤها م هي مراكز تكور المرآة المحدبة. ونلاحظ هنا أيضاً أن يكون بعد الصورة الحادثة بالمرآة المقعرة م عن المرآة المقعرة أكبر من نصف قطر تكور المرآة المحدبة.



شكل (5)

تحقق من صحة هذه النتيجة باستخدام المقياس الكرى "الاسفيرومتر" (راجع الطبيعة العملية الجزء الأول للمؤلفين).

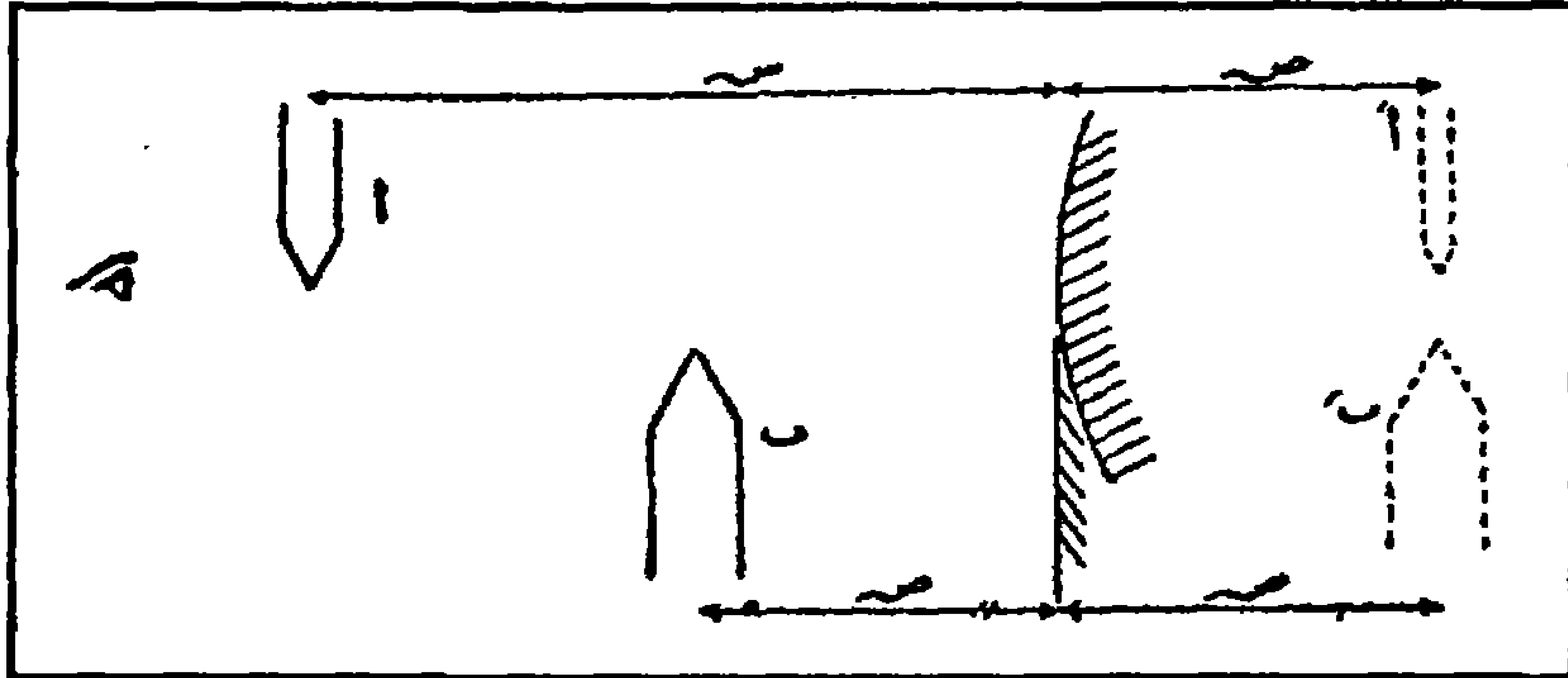
إيجاد قوة مرآة محدبة بطريقة انطباق المواضع:



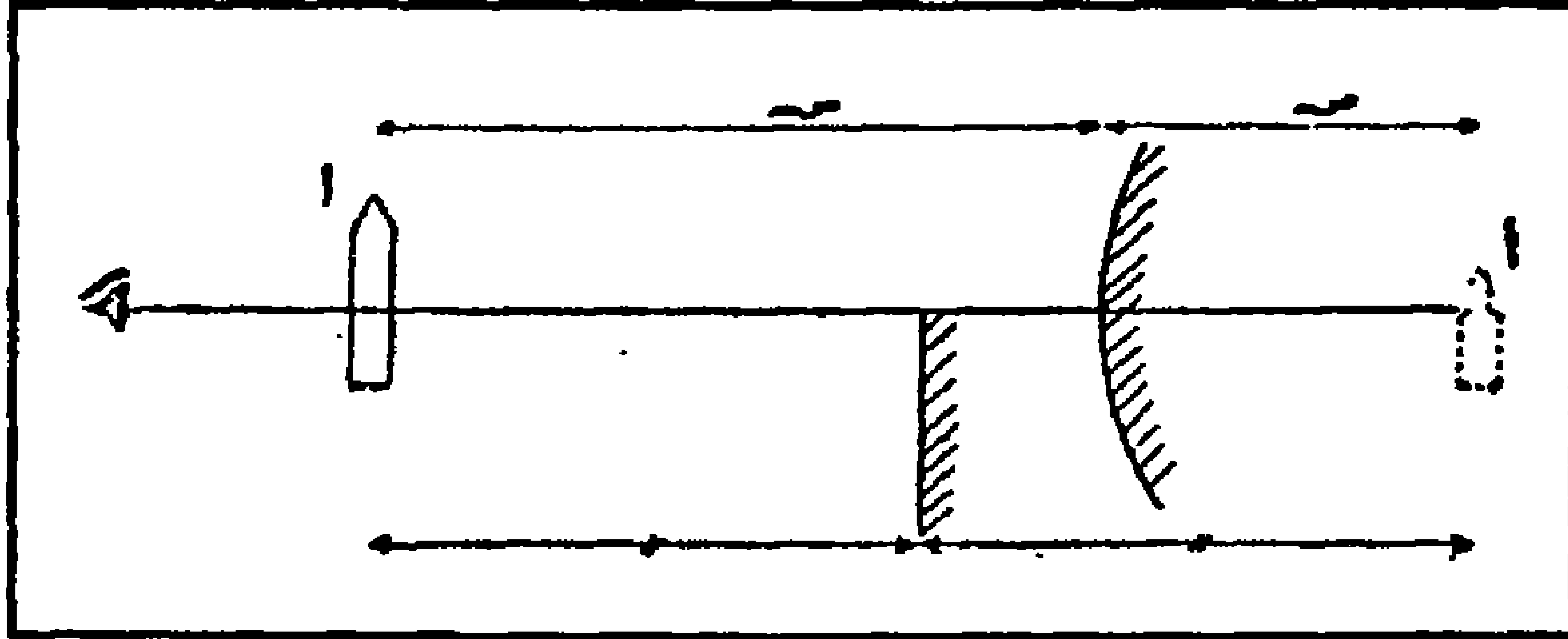
شكل (6)

فكرة هذه التجربة كما في التجربة السابقة في حالة الصورة التقديرية والموضحة (شكل 1) ويمكن تطبيقها في هذه التجربة كما هو مبين (شكل 6) وللحصول على

موضع أ بطريقة أخرى أسهل من استعمال الإبرة ب نجرب التعديل المبين في (شكل 7) حيث استعملنا مرآة مستوية ووضعنا السهم ب أمامها فنحاول أن نجعل صورة أ التقديرية الحادثة في المرآة المحدبة وهي أ تنطبق على ب صور ب الحادثة في المرآة المستوية وواضح من الشكل أن بعد الصورة هو بعد السهم ب عن المرآة المستوية. ويمكن إجراء التجربة بكيفية أخرى يوضحها (شكل 8).



الشكل (7)



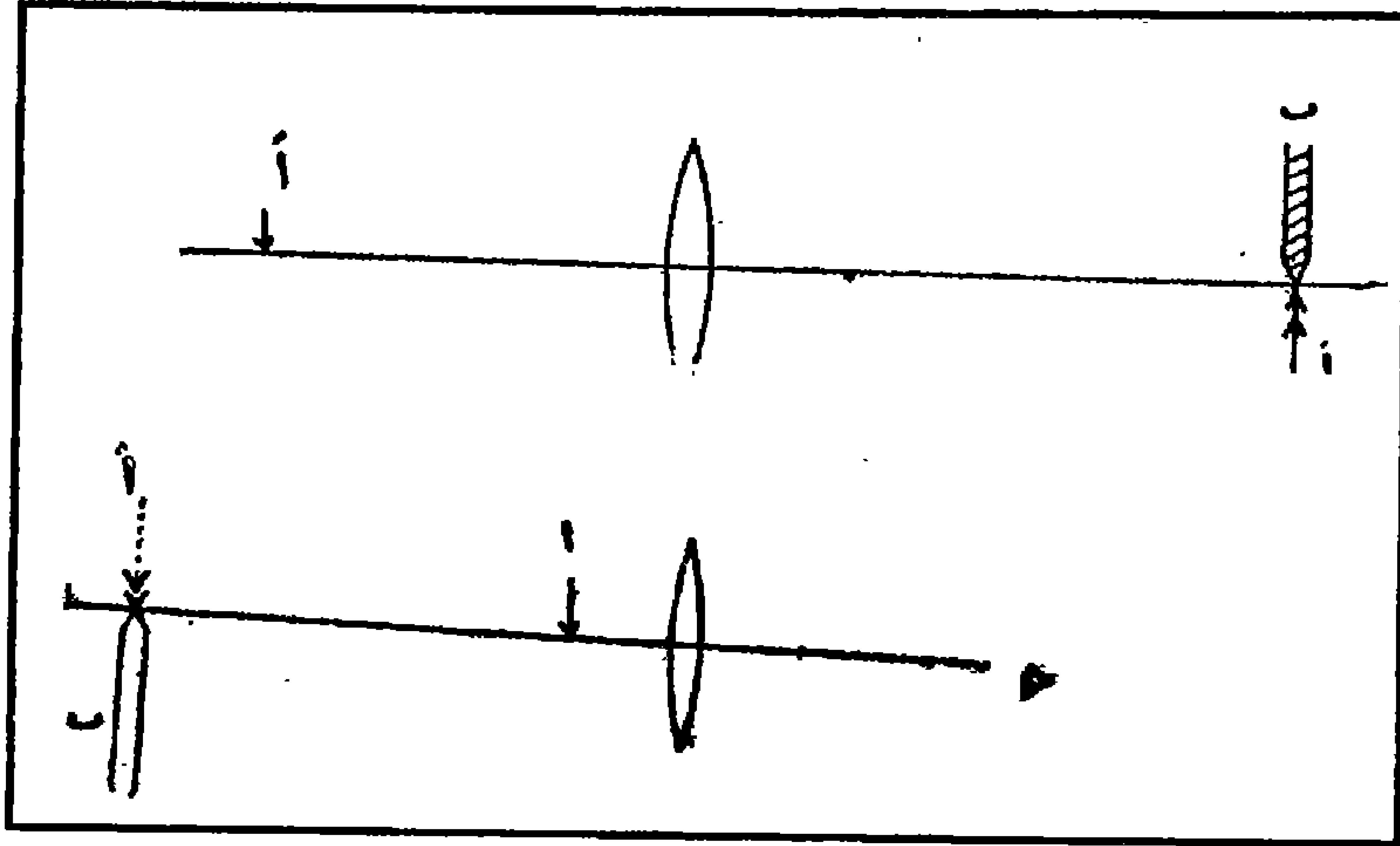
الشكل (8)

وذلك بأن نستخدم سهما واحداً أ ونضعه أمام المرآة المحدبة ونضع مرآة مستوية بين الجسم أ والمرآة بحيث تغطى نصف المرآة المحدبة كما في الشكل فنرى للسهم أ صورتين صورة مصغرة للجزء العلوي من السهم حادثة في المرآة المحدبة وباقي السهم تتكون له صورة في المرآة المستوية مساوية للجسم. نحرك المرآة المستوية إلى أن يحدث انطباق في المواضع بين صورتي جزئي السهم فيكون بعد السهم عن المرآة المستوية

مساوياً بعد الصورة عنها، نطرح منه البعد بين المرآتين نحصل على بعد الصورة عن المرآة المحدبة ويمكن تكرار التجربة لمواضع مختلفة للجسم.

إيجاد قوة عدسة محدبة بطريقة انطباق المواضع:

نظرية التجربة:



الشكل (9 أ، ب)

تستخدم فكرة انطباق الموضع أو عدم التغير في الموضع بين الصورة والسهم للحصول على موضع الصورة. وفي حالة العدسة المحدبة إذا كان بعد الجسم أكبر من البعد البؤري فإن الصورة تكون حقيقية كما في الشكل (9) ففي هذه الحالة يوضع السهم ب خلف العدسة ونحركه إلى أن يحدث انطباق المواضع. أما إذا كان الجسم على بعد أقل من البعد البؤري كما في الشكل (9 ب) فإن الصورة أ تكون تقديرية ويوضع السهم ب خلف الجسم ونحركه ليحدث انطباق المواضع مع الصورة أ ويمكننا بذلك تحديد س، ص لأوضاع مختلفة ثم نرسم خطاً بيانياً كما في البند السابق أو تستعمل القانون للحصول على عَ.

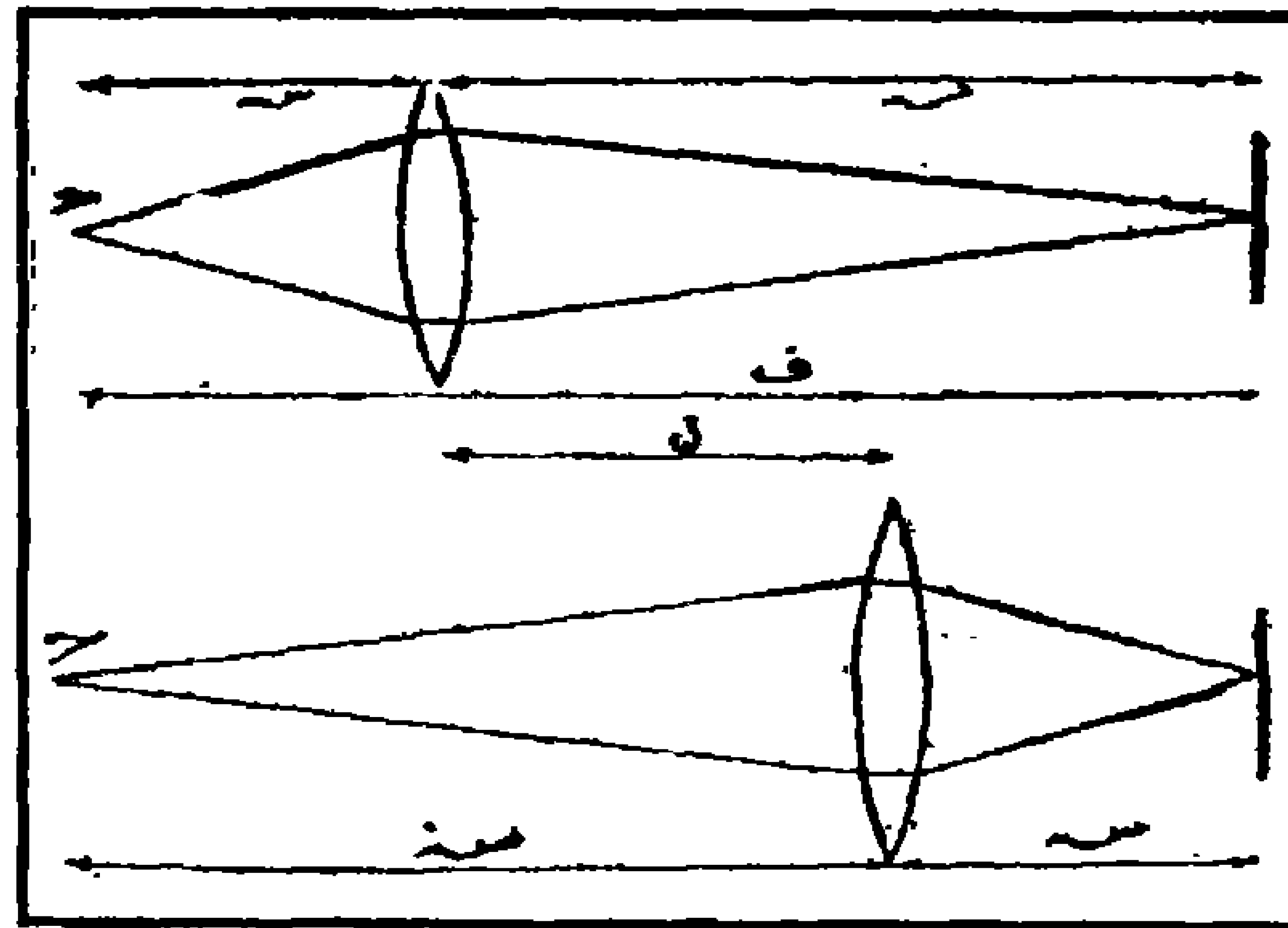
خطوات العمل:

نضع العدسة على منضدة ضوئية ونضع أمامها على بعد كبير نسبياً صندوقاً ضوئياً مرسوماً على فتحته سهماً أ ننظر إلى صورة السهم خلال العدسة مع مراعاة الشروط التي تساعد على ذلك، حدد موضع الصورة أ بالاستعانة بالسهم ب، حرك السهم أ نحو العدسة وفي كل حالة حدد موضع أ، كرر هذا العمل إلى أن تصبح أ البؤرة تقريباً وفي هذه الحالة لحصل على الصورة على بعد كبير خلف العدسة. إذا استمر تقريب السهم أ بعد ذلك فإن الصورة تصبح تقديرية وعلى ذلك حاول أن تحدد موضعها بوضع السهم ب أمام العدسة كما في (شكل 9 ب) كرر العمل وفي كل حالة دون قيمة س، ص. ارسم خطاً بيانياً كما في البند السابق أو استعمل القانون العام للحصول على أحسن قيمة لقوة العدسة عَ.

إيجاد قوة عدسة محدبة بطريقة الوضعين المتبادلين:

نظرية التجربة:

إذا تكونت صورة لجسم حـ في عدسة ولتكن هذه الصورة مكبرة كما في (شكل 10 أ) فإنه يمكن أن تصبح الصورة جسماً والجسم صورة أي أنه إذا وضع الجسم مكان الصورة فإن الصورة تتكون مكان الجسم وفي هذه الحالة تكون الصورة مصغرة ويمثل ذلك (شكل 10 ب) حيث أصبح الجسم حـ على بعد من العدسة يساوي بعد الصورة في الحالة الأولى عن العدسة فإذا كانت المسافة بين المصدر الضوئي جـ والحائل هي ف والبعد بين الوضعين المتبادلين للعدسة هو ل فإنه تتحقق العلاقة الآتية:



$$ع = \frac{ف^2 - ل^2}{4ف} \quad (1)$$

وللبرهنة على صحة هذه القاعدة نذكر أنه في العدسة اللامة

$$\frac{1}{ع} = \frac{1}{س} + \frac{1}{ص} = \frac{س + ص}{س\ ص}$$

$$\therefore ع = \frac{س\ ص}{س + ص} \quad (2)$$

بعد العدسة عن الحاجز في الحالة الثانية = بعد العدسة عن الجسم في الحالة الأولى في الصورة المكبرة.

$$ص = س + ل = ف - س \quad \therefore س = \frac{ف - ل}{2}$$

$$س = ص - ل = ف - ص \quad \therefore ص = \frac{ف + ل}{2}$$

وبالتعويض في (2) ينتج:

$$ع = \frac{ف^2 - ل^2}{4ف} \quad (3)$$

وتجري التجربة أحياناً باختيار مسافة مناسبة بين المصدر الضوئي والحاجز، ثم توضع العدسة للحصول على الوضع الذي نحصل فيه على أوضح صورة مكبرة، ثم الوضع الذي نحصل فيه على أوضح صورة مصغرة. المسافة بين الوضعين هي ل والمسافة بين المصدر الضوئي والحائل ف.

ويلاحظ أنه لكي يمكن الحصول على صورة حقيقية عندما نختار مسافة معينة بين الجسم والعدسة أن تكون هذه المسافة أكبر من أربعة أمثال البعد البؤري للعدسة وعندما تكون المسافة مساوية لأربعة أمثال البعد البؤري تكون ل = صفر أي نحصل على صورة واحدة وتكون مساوية للجسم.

خطوات العمل:

نضع العدسة على منضدة ضوئية ونضع أمامها على بعد كبير نوعا صندوق ضوئي به فتحة عليها سهم يمثل الجسم ونضع حائل خلف العدسة. نستقبل الصورة الحادثة على الحائل فتكون في أول الأمر مصغرة. نقرب الجسم تدريجياً وفي كل حالة نستقبل أوضح صورة إلى أن نحصل على صورة مساوية للجسم فيكون هو 2 ع وكذلك بعد الصورة عن العدسة فيكون 2 ع، أي أن بعد الجسم عن الحائل 4 ع وهي أقل مسافة ف يجب استخدامها في طريقة الوضعين المتبادلين نأخذ المسافة ف بين الجسم والحائل أكبر قليلاً من القيمة السابقة. نثبت الجسم والحائل ونحصل على أوضح صورة مكبرة ثم نزيح العدسة إلى أن نحصل على أوضح صورة مصغرة نسجل إزاحة العدسة ل بين الوضعين ونعوض في القانون (1) للحصول على ع. نزيد المسافة ف تدريجياً وفي كل حالة نوجد ل وندون القراءات.

القراءات:

ف	ل	ع

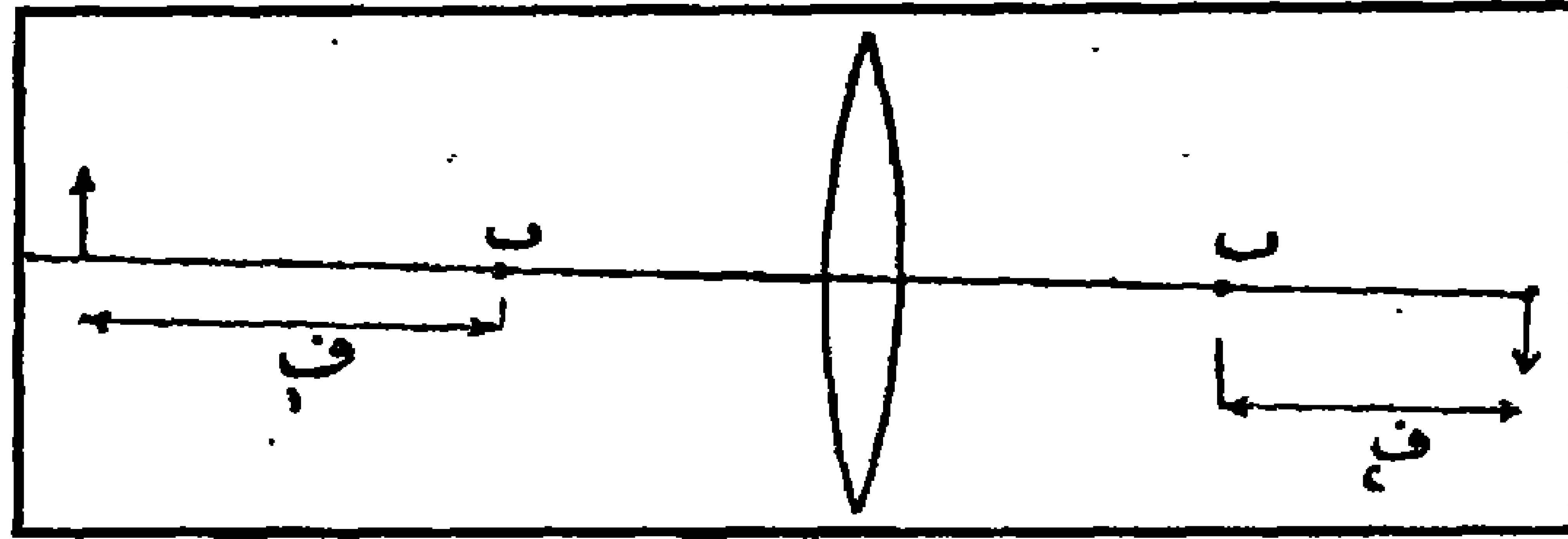
متوسط البعد البؤري = سم = م

∴ قوة العدسة = ديوبتر

إيجاد قوة عدسة محدبة بطريقة بعدى الجسم والصورة عن بؤرتي العدسة (قاعدة نيوتن):

نظرية التجربة:

إذا لم يكن من المتيسر قياس المسافات من مركز العدسة كما في حالة العدسة السميكة فيمكن استخدام قاعدة نيوتن. وتعطى العلاقة بين البعد البؤري ع وبعد الجسم $ف_1$ عن البؤرة التي في جهته، وبعد الصورة $ف_2$ عن البؤرة التي في جهتها أي: $ع^2 = ف_1 ف_2$.



الشكل 11

خطوات العمل:

حدد بؤرتي العدسة ب، ب باستخدام جسم بعيد أو باستخدام جسم ومرآة مستوية. ضع الجسم على بعد كبير نوعاً من العدسة واستقبل أوضح صورة على الحائل. قس البعدين $ف_1$، $ف_2$ (شكل 11). قرب الجسم مسافة مناسبة ثم أوجد أوضح صورة وكرر العمل في أوضاع مختلفة للجسم وفي كل حالة سجل البعدين $ف_1$، $ف_2$.

القراءات:

$ف_1$	$ف_2$	$ع_2 = \sqrt{ف_1 ف_2}$

متوسط البعد البؤري ع =   سم = م

∴ قوة العدسة عَ =   ديوبتر

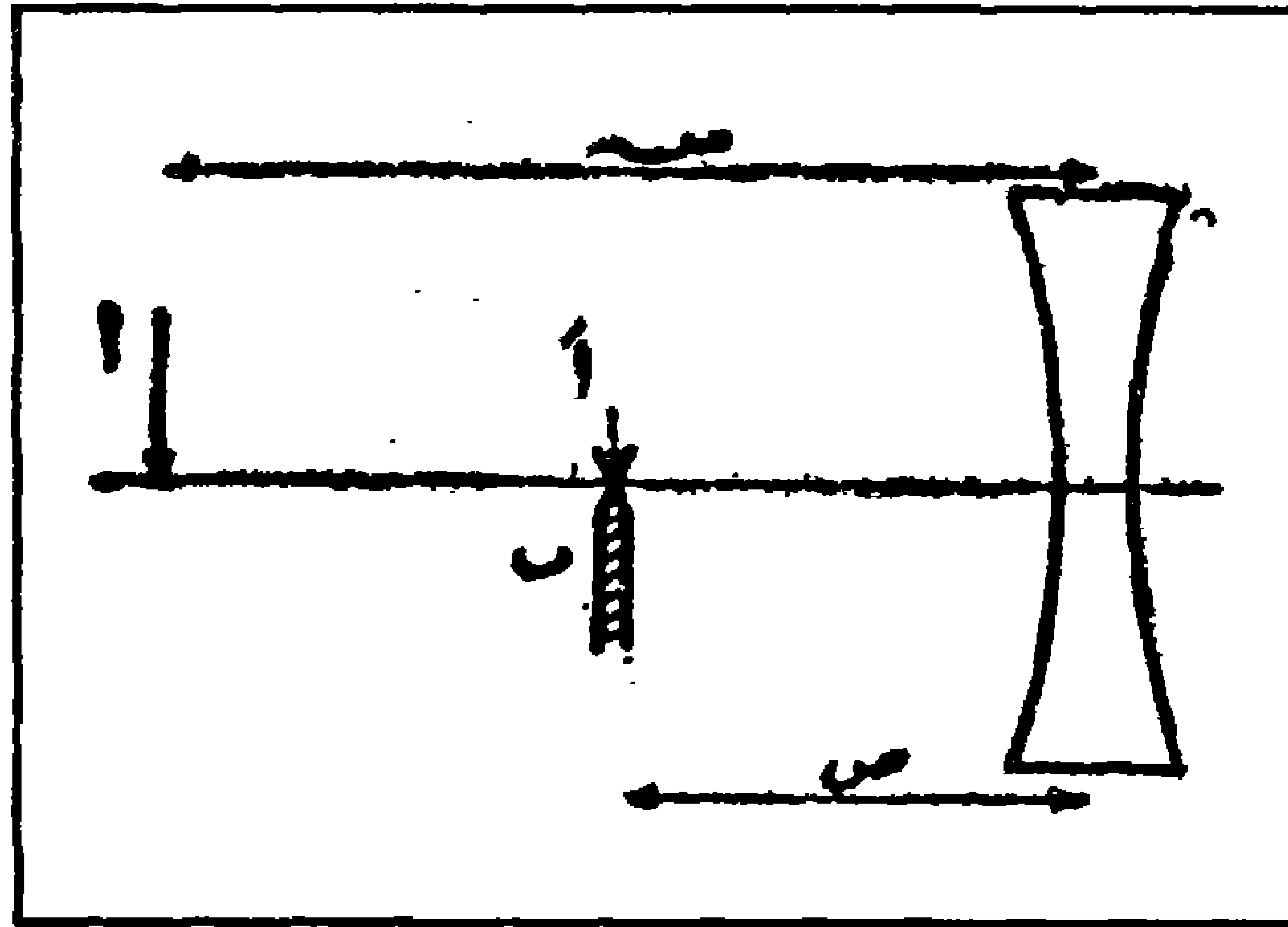
إيجاد قوة عدسة مفرقة بطريقة انطباق المواضع:

نظرية التجربة:

إذا وضع جسم أمام عدسة مقعرة فإن الصورة الناتجة تكون دائماً تقديرية ومصغرة ويمكن تحديد موضع الصورة باستخدام طريقة إنطباق المواضع وبتطبيق القانون العام للعدسات سَ + عَ = صَ يمكن الحصول على عَ مع ملاحظة أن سَ سالبة وكذلك صَ.

خطوات العمل:

نبدأ بوضع الجسم أ على بعد كبير من العدسة ونحاول أن نحصل على موضع الصورة التقديرية أ باستعمال السهم ب مستخدمين فكرة انطباق المواضع. بعد أ عن العدسة يمثل س وبعد ب عن العدسة يمثل ص نقرب السهم أ تدريجياً وفي كل حالة نوجد س، ص ندون النتائج في جدول ونستخدم الرسم البياني أو القانون العام كما في التجارب السابقة.

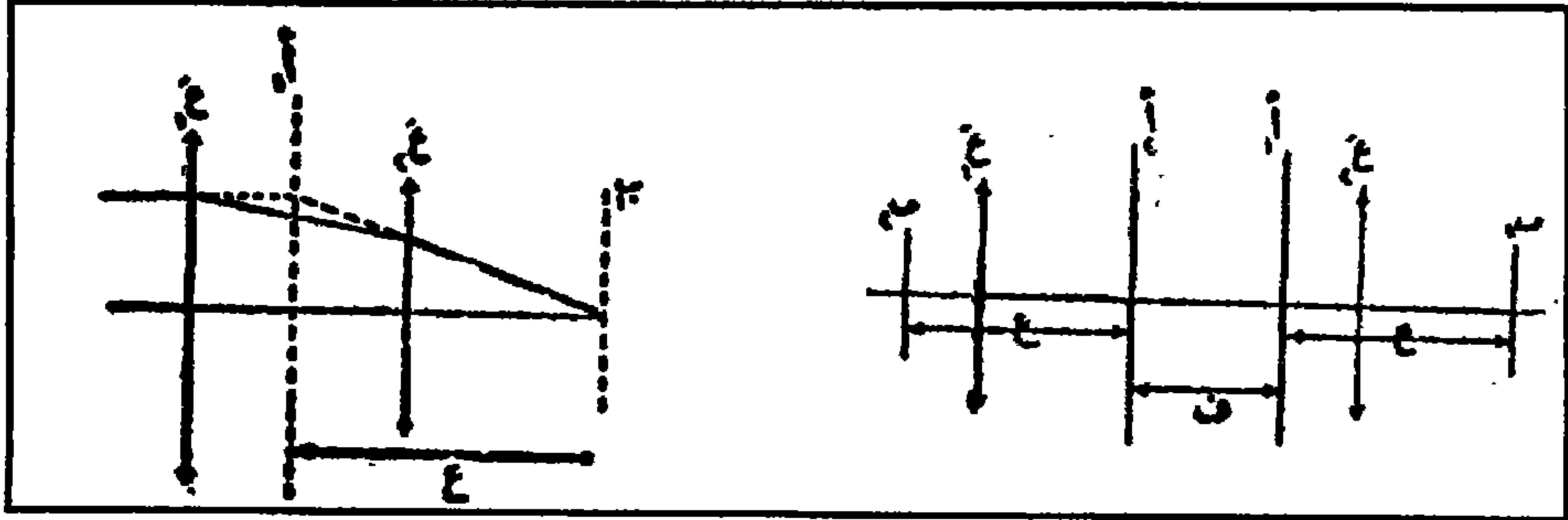


الشكل (12)

العدسة المكافئة:

قوة العدسة المكافئة:

إذا كونا مجموعة من عدستين رقيقتين متلاصقتين قوتاهما عَ1، عَ فإن قوة العدسة المفردة التي تقوم مقامهما ونرمز لها بالرمز عَ تعطى بالمعادلة عَ = عَ1 + عَ2.



الشكل (13)

أما إذا كانت العدستان بينهما مسافة ف فإن العدسة المتكافئة قوتها تعطى بالقانون:

$$عَ = عَ_1 + عَ_2 - ف\,عَ_1 عَ_2$$

ولكي تؤدي العدسة التي قوتها تعطى بهذا القانون نفس العمل الذي تؤديه العدستان معاً يجب أن توضع في موضع معين ويتوقف هذا الموضع على جهة سقوط الأشعة لذا فإن العدسة المكافئة لها موضوعين يسميان بالمستويين الأساسيين وهما ممثلان في (شكل 13 أ) بالمستويين $أ_1$، $أ_2$. أي العدسة المكافأة تمثل تمثيلاً كاملاً بالمستويين البؤريين $ب_1$، $ب_2$ والمستويين الأساسيين $أ_1$، $أ_2$.

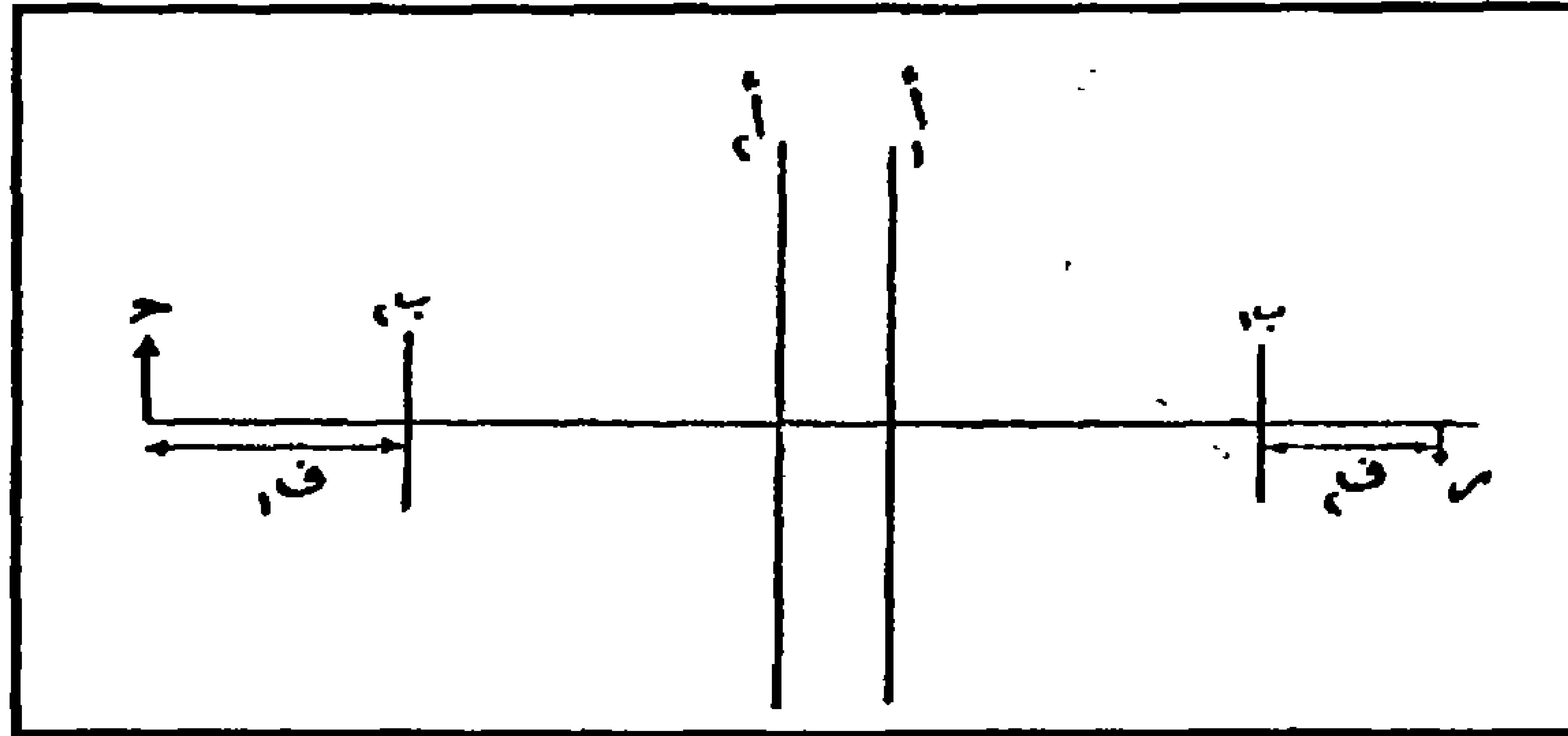
ويلاحظ أن المستوى البؤري $ب_2$ مثلاً هو المستوى الذي تتكون فيه بؤرة الأشعة المتوازية الساقطة من جهة اليسار. والمستوى الأساسي $أ_1$ هو المستوى الناتج من التقاء الأشعة المتوازية الساقطة من جهة اليسار بالأشعة المتجمعة في البؤرة (شكل 13 ب).

البعد بين أ1، ب1 هو البعد البؤري المكافئ ع، مقلوب هذا البعد هو قوة العدسة المكافئة عَ التي تعطى قيمتها بالقانون (2). بنفس الكيفية نعرف أ2، ب2 والبعد بينهما هو أيضاً ع.

العدسة السميكة:

يمكن اعتبار العدسة السميكة كما لو كانت عبارة عن عدستين رقيقتين بينهما مسافة. لذا فهي لها مستويين أساسيين ومستويين بؤريين وقوة مكافئة.

العلاقة بين بعدي الجسم والصورة عن بؤرتي العدسة المكافئة (قاعدة نيوتن):



شكل (14)

إذا رمزنا لبعد الجسم عن البؤرة التي في جهتها بالرمز $ف_1$ ولبعد الصورة عن البؤرة التي في جهتها بالرمز $ف_2$ فإن العلاقة بينهما تعطى بالقانون:

$$ع^2 = ف_1 \, ف_2$$

حيث ع هي البعد البؤري المكافئ وهذه هي قاعدة نيوتن التي سبق الإشارة إليها وهي تصلح لإيجاد البعد البؤري المكافئ لمجموعة عدسات إذا كانت مجموعة مجمعة كما يمكن تحديد المستويين الأساسيين.

إيجاد القوة المكافئة لمجموعة عدستين بينهما مسافة:

نظرية التجربة:

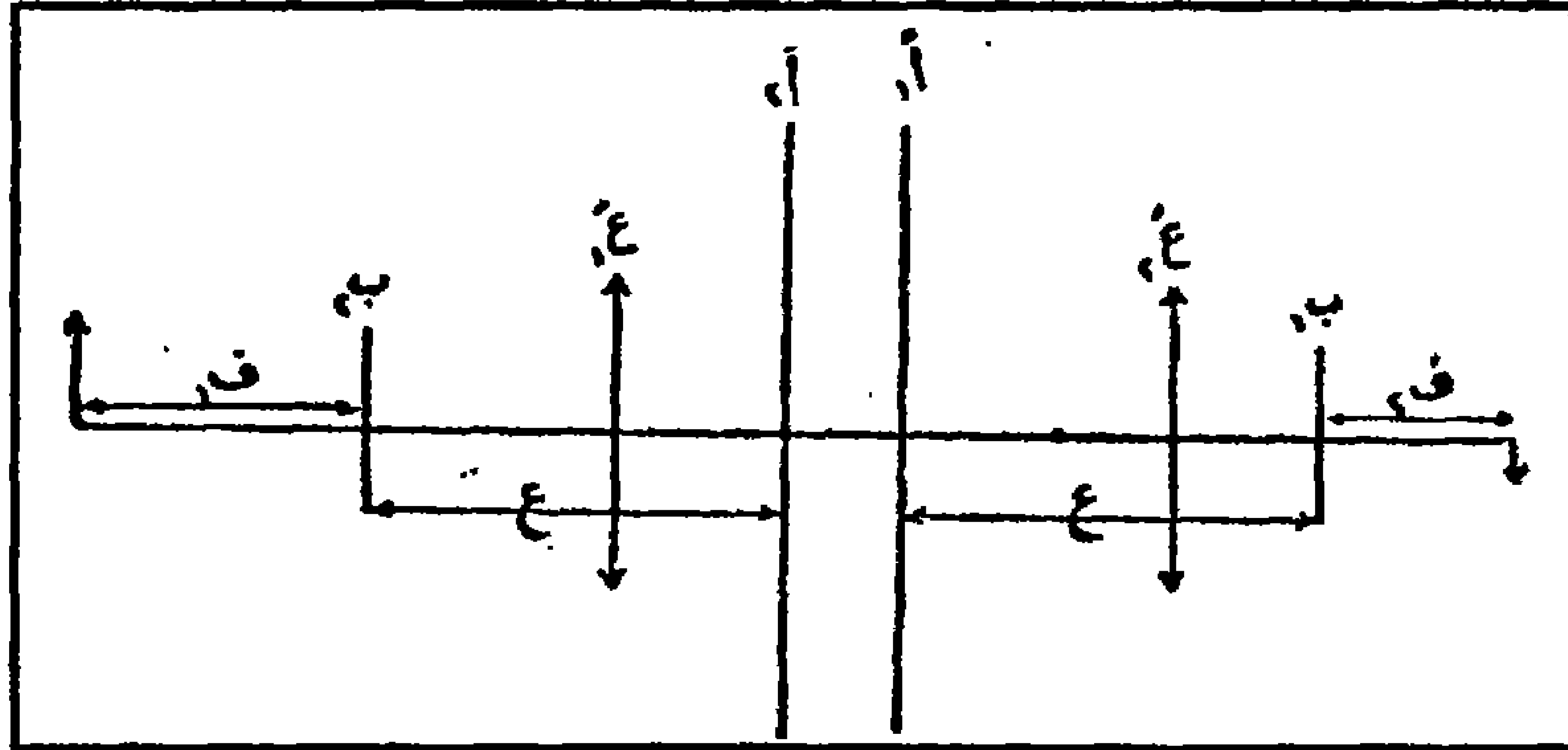
لكي يمكن استخدام قاعدة نيوتن لإيجاد قوة مجموعة عدستين بينهما مسافة يلزم أن تكون المجموعة مجمعة أي قوتها موجبة وفي هذه الحالة يمكن تكوين صورة حقيقية للجسم. ولتكوين مجموعة مجمعة من عدستين لامتين يلزم أن تكون المسافة بينهما أقل من بعد معين ويمكن تحديد هذا البعد من المعادلة

ع = عَ$_1$ + عَ$_2$ − ف عَ$_1$ عَ$_2$ ، وضع عَ = صفر

والتعويض عن ع، ع$_2$ فنحصل على قيمة ف التي تجعل عَ = صفر إذا زادت ف عن هذا المقدار فإن عَ تكون عدسة سالبة وبواسطة مجموعة مجمعة يمكن تكوين صورة حقيقية وتطبيق قاعدة البند السابق.

خطوات العمل:

نضع العدستين على المنضدة بحيث تكون المسافة بنيهما هي البعد المطلوب نضع على المحور الأساسي للمجموعة في جهة منها مصدراً ضوئياً بعيداً بعداً كافياً ونحدد صورته فتكون هي البؤرة ب$_1$ مثلاً. نسقط أشعة من جسم بعيد من الجهة الأخرى ونوجد الصورة فتكون هي البؤرة ب$_2$.



الشكل (15)

نضع الجسم على بعد ما من المجموعة ليكون بعده عن البؤرة التي في جهته $ب_2$ هو $ف_1$ ونستقبل أوضح صورة على الحائل نقيس بعد الصور عن $ب_1$ فيكون هو $ف_2$. نعوض في القانون $ع^2$ = $ف_1$ $ف_2$ فنحصل على البعد البؤري المكافئ ع ومنه نوجد قوة العدسة المكافئة عَ نقيس بعد أ يساوي ع ابتداء من $ب_1$ جهة المجموعة فنحصل على المستوى الأساسي $أ_1$. وبالمثل نقيس ابتداء من $ب_1$ نحو المجموعة طولاً يساوي ع نحصل على $أ_2$. ويمكن الاستغناء عن الجسم البعيد وإجراء التجربة بطريقة أخرى كالآتي:

نحرك الجسم أمام المجموعة إلى أن نحصل على صورة مساوية للجسم تماماً ويمكن لتحقيق ذلك استخدام حائل عليه ورقة مربعات مقسمة إلى سنتيمترات وملليمترات. نحدد موضع كل من الجسم والصورة في هذه الحالة. نحرك الجسم نحو المجموعة إلى أن نحصل على صورة طولها ضعفي الجسم فتكون المسافة التي تحركها الجسم من الموضع الأولى إلى الموضع الثاني تساوي ع، والمسافة التي تحركتها الصورة = ع (البعد البؤري المكافئ) مقلوب هذا البعد يعطي القوة المكافئة. نعيد الجسم إلى الوضع الأول فتصبح الصورة مساوية للجسم مرة أخرى. نقيس بعد أ = ع جهة المجموعة ابتداء من موضع الصورة في الوضع الأخير نحصل على المستوى البؤري الأول $ب_1$ وكذلك نقيس بعد أ= ع جهة المجموعة ابتداء من موضع الجسم فنحصل على المستوى البؤري الثاني $ب_2$. نقيس مسافة أخرى ع ابتداء من $ب_1$ في نفس الاتجاه السابق لحصل على المستوى الأساسي الأول $أ_1$ وبالمثل نحصل على المستوى الأساسي الثاني $أ_2$.

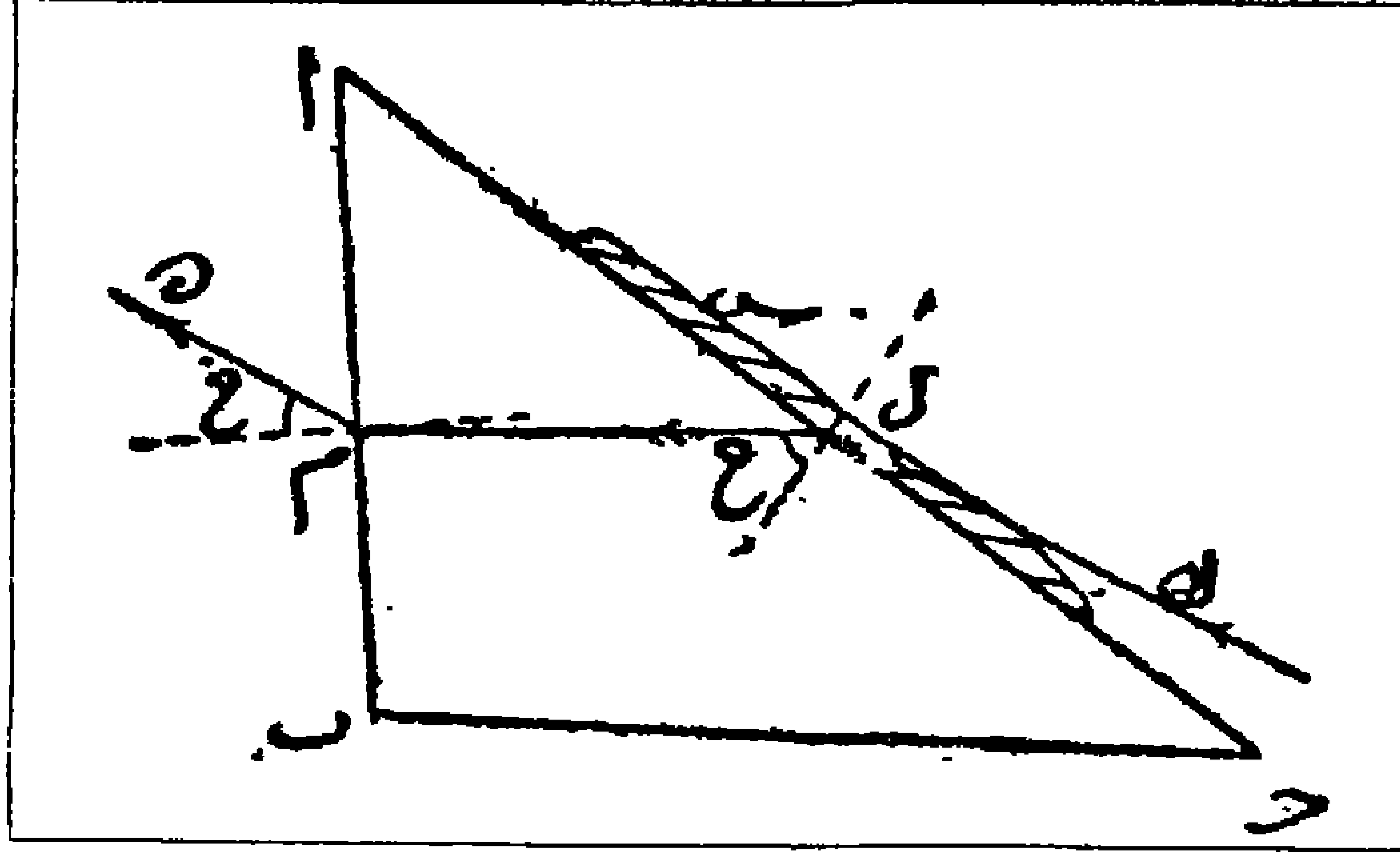
ملحوظة:

تحقق من صحة النتائج العملية السابقة باستخدام القانون:

$$عَ = عَ_1 + عَ_2 - ف عَ_1 عَ_2$$

وذلك بإيجاد عَ$_1$، عَ$_2$ والتعويض في القانون وباستخدام الحساب يمكن تحديد كل من ب$_1$، ب$_2$ وبمعرفة ع من القانون السابق يمكن تحديد المستويين الأساسيين أ$_1$، أ$_2$. قارن هذه النتائج الحسابية بالنتائج العملية التي حصلت عليها سابقاً.

إيجاد معامل انكسار الضوء في سائل باستخدام مقياس الانكسار لآبي:



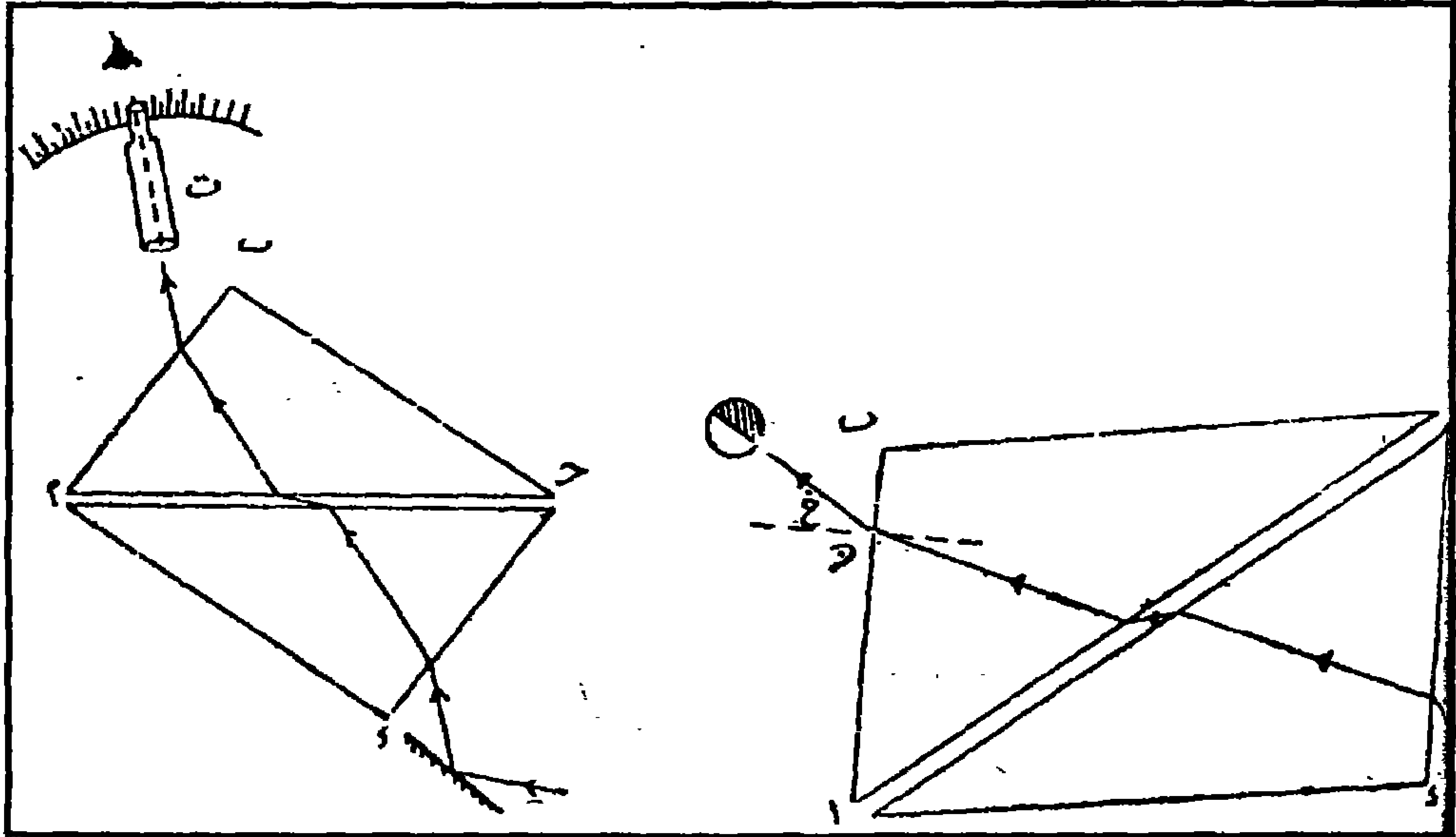
شكل (16)

نظرية التجربة:

يتكون جهاز الانكسار لآبي من منشور من الزجاج الصخري الكثيف أي الذي معامل انكسار الضوء فيه كبير فإذا فرضنا منشور من هذا النوع أ ب جـ عليه طبقة رقيقة من سائل س فوق الوجه أ جـ، إذا سقط شعاع من الضوء في السائل في اتجاه يكاد يوازي هذا الوجه مثل الشعاع ك ل انكسر هذا الشعاع داخل المنشور بزاوية ح هي الزاوية الحرجة بين السائل والزجاج ونفذ الشعاع من الوجه ب أ للمنشور في الاتجاه م ن وتكون زاوية خروجه ح، حيث يلاحظ أن أي شعاع آخر يسقط في السائل في اتجاه أقرب إلى العمود على الوجه أ جـ من اتجاه الشعاع ك ل تكون زاوية خروجه أصغر من ح وعليه فالشعاع م ن هو الحد الفاصل بين النور والظلام فإذا وجه تلسكوب ت على امتداد م هـ شوهد مجال النظر مقسوماً إلى نصف مظلم وآخر مضيء ويتحرك التلسكوب على مقياس مدرج بمعاملات الانكسار مباشرة.

فإذا هيء التلسكوب بحيث نشاهد نقطة تقاطع السلكين المتعامدين في عينيته مارة بالحد الفاصل بين النور والظلام فإن التدريج المقابل لموضع التلسكوب يعطى معامل إنكسار الضوء للسائل المستخدم.

ويستعمل جهاز الإنكسار لأبي لقياس معامل انكسار الأجسام الصلبة والسوائل المحصور معامل انكسارها بين 1.3 – 1.7 ويمكن تعيين معامل الانكسار مقرباً إلى الرقم العشري الرابع.



شكل (17 أ + ب)

ويتركب الجهاز عارة من منشورين (شكل (17) أ ب جـ، أء جـ يتصلان مفصلياً عند أ ليسمح للمنشور السفلي أن يبتعد عن المنشور العلوي أو يلتصق به عند الوجه أجـ للمنشور السفلي من الزجاج الكثيف ووجهه أ جـ غير مصقول أما المنشور العلوي فوجهه مصقول وتوضع على الوجه أ جـ للمنشور السفلي قطرة من السائل المراد إيجاد معامل انكساره ثم نلصق المنشورين وبذا تكون قطرة السائل طبقة رقيقة منه بين المنشورين. ويعمل المنشور السفلى على توجيه الضوء نحو المنشور العادي بحيث يسقط الضوء في طبقة السائل في اتجاه يكاد يوازي الوجه أ جـ (شكل 17 – ب)

ويلاحظ أن معامل انكسار المنشور العلوي أكبر من معامل انكسار السائل المراد إيجاد معامل انكساره.

ويوجه ضوء كهربي أو ضوء النهار نحو المنشور السفلي بواسطة مرآة متصلة بالجهاز ويمر الضوء خلال المنشورين ليستقبل خلال التلسكوب ونبحث عن الوضع الذي نرى فيه مجال النظر منقسماً إلى نصفين أحدهما معتم والآخر مضيء ونضبط نقطة تقاطع السلكين المتعامدين في عينيه التلسكوب على الحد الفاصل بين الظلام والإضاءة ثم نقرأ التدريج الدال على معامل الانكسار. والجهاز مزود بغرفة تحيط بالمنشور يمر بها تيار منتم من الماء يمكن تثبيت درجة حرارته بواسطة منظم حراري (ثرموستات) وبذا يمكن إيجاد معامل الانكسار عند درجات حرارة مختلفة.

خطوات العمل:

لدراسة تغير معامل انكسار الضوء في سائل بتغير درجة الحرارة تؤخذ قطرة من هذا السائل وتوضع بين المنشورين. ويعد منظم حراري من النوع الكهربائي المستعمل عادة في المعامل thermostat فيملأ إلى علامة معينة بالماء، ويضبط دليل المنظم على الدرجة المراد قياس معامل الانكسار عندها (مثلاً 20°)، ثم توصل فتحتى دخول وخروج الماء للمنظم الحراري بفتحتين متقابلتين بالغرفة المحيطة بمنشوري جهاز آبي وبذا يمكن أن ينتقل تيار مائي من المنظم ليمر حول المنشورين ويعود للمنظم ثانية، ويتم ذلك عند توصيل المنظم الحراري بالمصدر العمومي للتيار الكهربائي حيث يعمل التيار الكهربائي على تسخين الماء وتشغيل محرك. كذلك فإن دليل المنظم الحراري يعمل تلقائياً لوجود عنصر حراري يعمل على تنظيم التيار الكهربائي المار بحيث تثبت درجة الحرارة عند الدرجة المطلوبة المثبت عندها الدليل. وعند توصيل الجهاز الكهربائي يضيء مصباح بياني indicator lamp بضوء أحمر وعند وصول درجة الحرارة إلى الدرجة المطلوبة يطفأ النور الأحمر وعند ذلك يمكن أخذ قراءة الترمومتر المتصل بالغرفة المحيطة بالمنشورين. نهيئ منظار معامل الانكسار كما سبق أن بينا في

البند السابق لنرى تقاطع السلكين في عينية المنظار منطبقة على الحد الفاصل بين الظلام والإضاءة ونقرأ التدريج الدال على معامل الانكسار، نغير درجة الحرارة المطلوب تثبيت المنظم عندها مثلاً (40°) وننتظر إلى أن تثبت درجة الحرارة عند هذه الدرجة المطلوبة وتقرأ معامل الانكسار ونكرر العمل لدرجات حرارة مختلفة.

وفي حالة إيجاد العلاقة بين معامل الانكسار ودرجة التركيز يعمل محلول مشبع ونعتبر درجة تركيزه 100٪ فإذا أريد الحصول على درجات تركيز مختلفة يضاف الماء تدريجياً إلى كمية معينة من هذا المحلول المركز (مثلاً 10 سم3) وإذا لاحظنا أن حجم المحلول النهائي يتناسب عكسياً مع درجة التركيز فإننا نستنتج أن حجم المحلول المخفف × درجة التركيز يساوي مقدار ثابت ويمكن كتابة هذه العلاقة بصورة رمزية كالآتي.

ح م × ت م = ح × ت

حيث ح م، ح. ترمزان إلى حجم المحلول المشبع وحجم المحلول المخفف، ت م، ت ترمزان إلى درجة تركيز المحلول المشبع والمحلول المخفف على الترتيب. وعادة نحصل على محاليل مخففة مختلفة التركيز بأخذ أحجام مختلفة من المحلول المركز وتكمله المحلول المخفف إلى حجم معين كما هو معتاد في الكيمياء العيارية حيث تستخدم أوعية ذات سعة معينة، مثلاً 10 سم^3، أو 25 سم^3، فإذا فرضنا أن حجم المحلول المخفف "ح" معلوم وليكن 10 سم (سعة الوعاء المستعمل)، ت م درجة تركيز المحلول المشبع ويمثلها الرقم 100، فإن حجم المحلول المركز الذي يلزم للحصول على درجة تركيز معينة يعطى بالمعادلة:

ح م × 100 = 10 × ت

$$\therefore \text{ح م} = \frac{10\ \text{ت}}{100} = \frac{\text{ت}}{10}$$

فإذا كانت درجات التركيز المطلوبة هي 90، 80، 70 .... الخ. فإن أحجام المحاليل المركزة المطلوب تكملتها إلى الحجم المعين (10 سم^3) هي 9، 8، 7 ... سم3 على الترتيب. وبصفة عامة يمكن كتابة المعادلة (2) على الصورة:

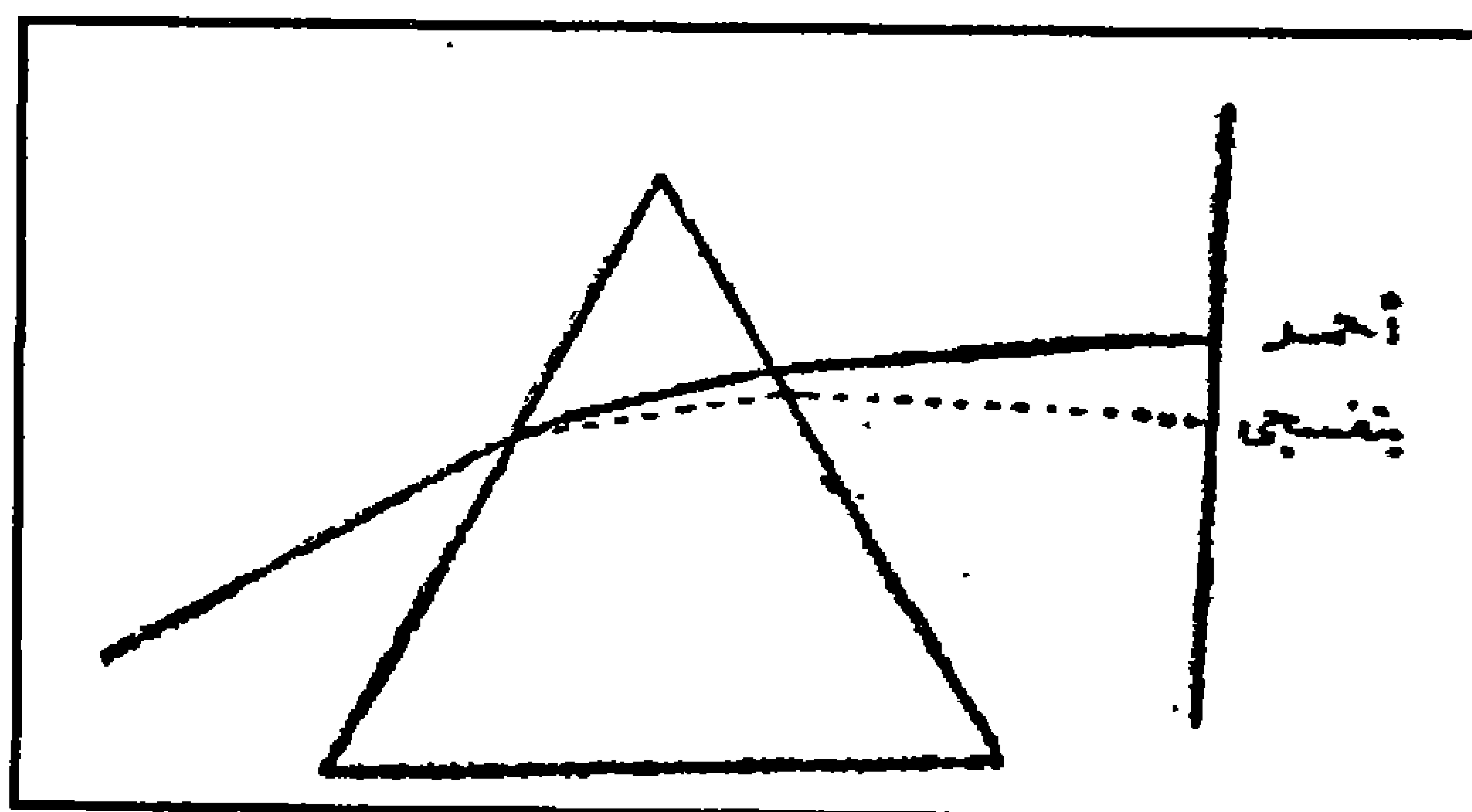
$$ح_م = ح \times \frac{ت}{ت_م}$$

أي حجم المحلول المشبع المراد تخفيفه إلى حجم قياسي

= الحجم القياسي × النسبة المئوية للتركيز

القياس الطيفي:

مقياس الطيف:



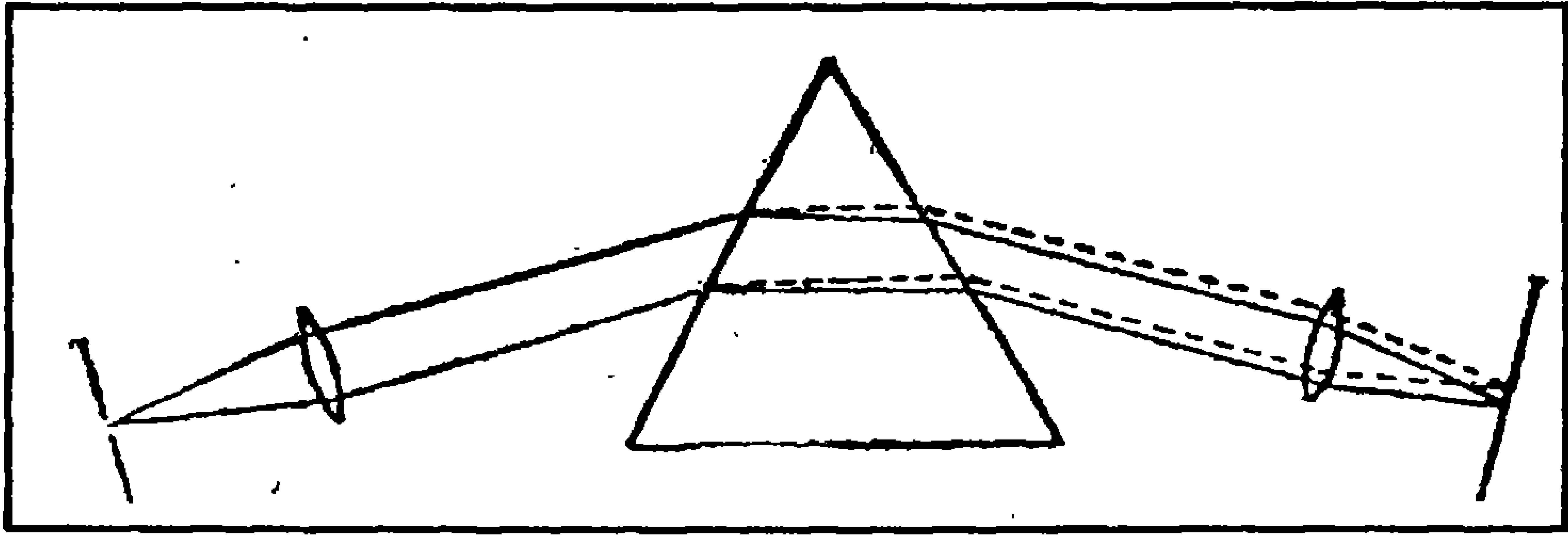
إذا سقطت أشعة بيضاء على أحد جانبي منشور ثلاثي (شكل 18) فإنها تخرج من المنشور وقد انحرفت عن مسارها الأصل وتشتت أو تفرقت إلى عدة ألوان وهي الألوان السبعة المعروفة في الطيف ومعنى هذا أن الضوء الأبيض هو ضوء مركب وأن معامل انكسار مادة المنشور يتوقف على نوع الشعاع (لونه) بالإضافة إلى توقفه على مادته فإن القانون:

$$م = \frac{جا \frac{د + أ}{2}}{جا \frac{أ}{2}}$$

تكون فيه زاوية الانحراف الصغرى ن متوقفة علـى اللـون الـذي نعنيـه، فزاويـة النهاية الصغرى للانحـراف للـون الأحمـر أقـل مـن زاويـة الانحـراف الصـغرى للـون البنفسجي ويمكن أن نكتب معامل الانكسار للون البنفسجي مثلاً:

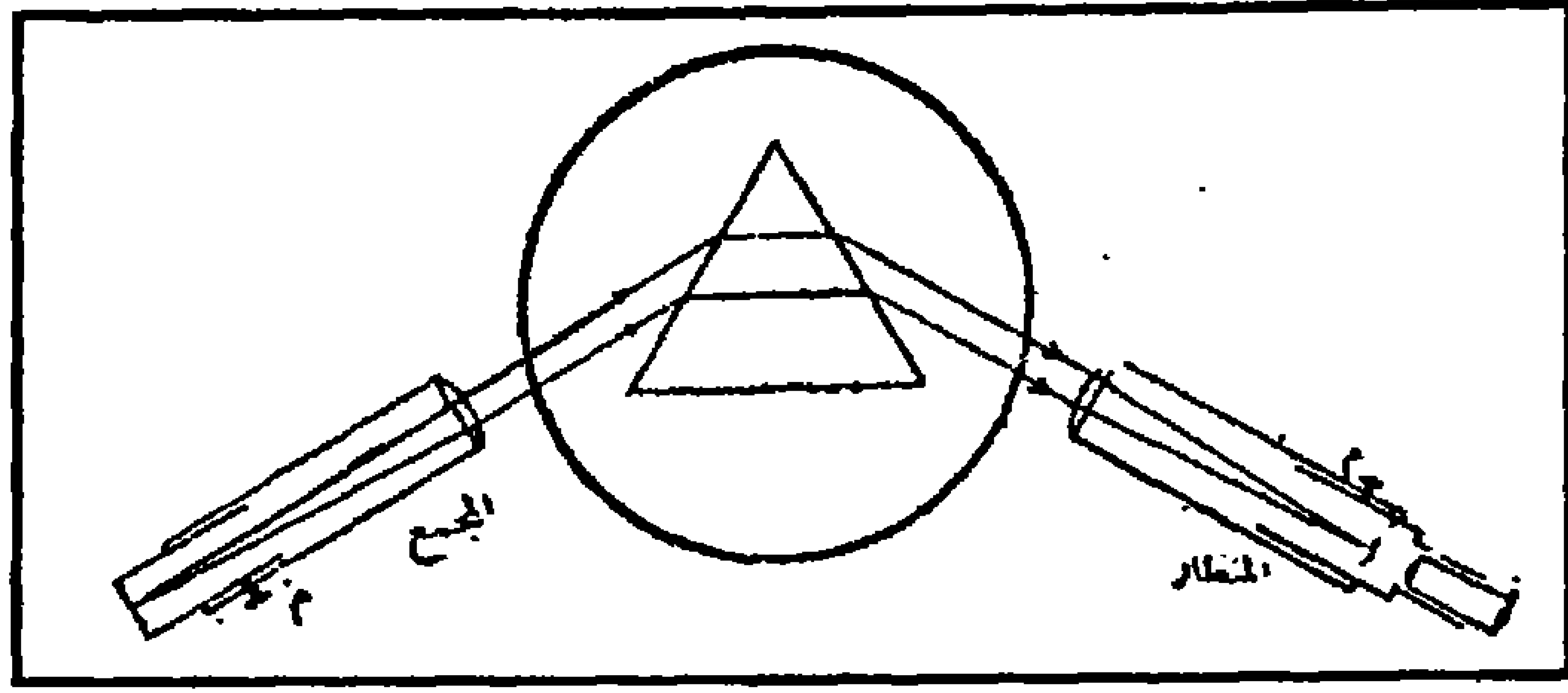
$$م = \frac{جا\frac{ن_{ب} + 1}{2}}{جا\frac{ا}{2}}$$

وهكذا في باقي الألوان.



الشكل (18 أ)

ويستخدم مقياس الطيف "الاسبكترومتر" لدراسة الطيف وإيجاد زاوية رأس منشور بدقة وإيجاد زاوية الانحراف الصغرى لكل لون وبالتالي إيجـاد معامـل الانكسـار لكـل لون من ألوان الطيف. وللحصول على طيف نقـي علـى حـاجز، أي لا تتـداخل فيـه الألوان مع بعضها البعض تسـتعمل فتحـة مسـتطيلة ضـيقة قريبـة جـداً مـن المصـدر الضوئي ولجعل الأشعة المارة في المنشـور متوازيـة ونسـتخدم وضـع النهايـة الصـغرى للانحراف وتجمع الأشعة الخارجة بعدسة لامة، ويحقق (شكل 18 ب) هذه الشروط.



الشكل (18 ب)

ومقياس الطيف فكرته هي فكرة الرسم الموضح شكل (18 أ) والذي يحقق لنا الشروط المذكورة بأسرع وأبسط طريق وهو يتكون كما في الشكل التوضيحي (18 ب) من المجمع الذي ينتهي بأنبوبة صغيرة تحمل فتحة مستطيلة يمكن تحريكها بواسطة مسمار محوى مَ بحيث يتغير بعد الفتحة عن الطرف الآخر من المجمع الذي ينتهي بعدسة محدبة عندما تصبح الفتحة في بؤرة العدسة تخرج الأشعة من المجمع متوازية لتسقط على المنشور. الأشعة المتوازية الخارجة من المنشور تتجمع في بؤرة شيئية المنظار حيث يتكون الطيف ويمكن وضع مقياس في هذا الموضع. بالنظر في عينية المنظار نرى صورة مكبرة للطيف ولضبط المنظار يجب أن تكون العينية مضبوطة لرؤية أوضح صورة للمقياس المبين بالشكل أو سلك متقاطع كما هو المعتاد في الأجهزة الضوئية ويلاحظ أن موضع التدريج أو السلك هو الوضع الذي تتكون فيه صورة حقيقية للمصدر فإذا كان المصدر ذي لون وحيد ظهرت صورة الفتحة بهذا اللون وإذا كان المصدر أبيض ظهرت صورته بالألوان السبعة المعروفة. ولضبط العينية نحركها إلى الداخل والخارج إلى أن نرى أوضح صورة للسلك المتقاطع. ولضبط المنظار لاستقبال الأشعة المتوازية نوجهه إلى جسم بعيد وتضبط المنظار.

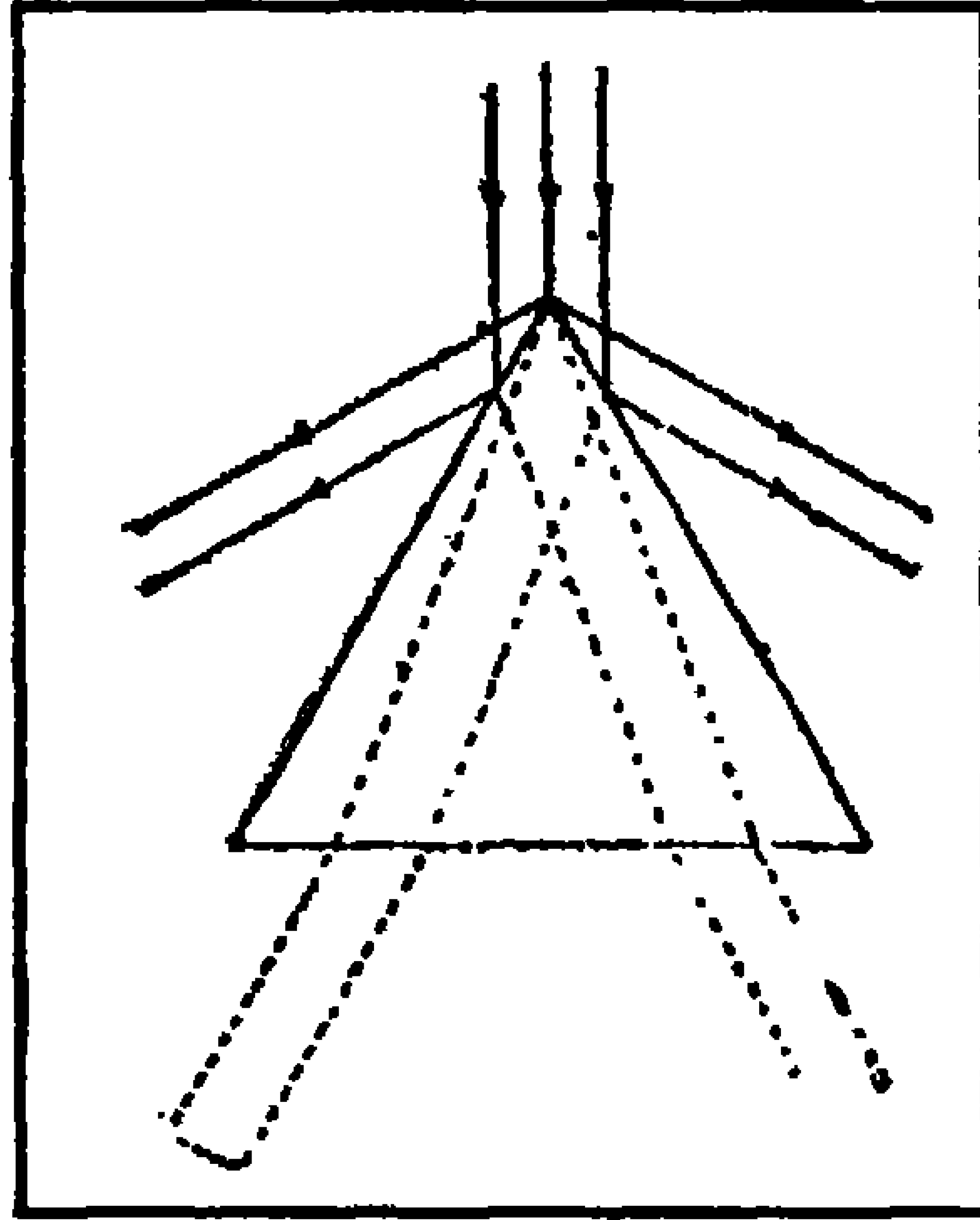
ويكون المجمع ثابتاً في جسم الجهاز ومحوره متجه نحو مركز دائرة ثابتة في الجهاز يظهر منها تدريج للزوايا ومثبت في هذه الدائرة منزلقة (ورنية). أما المنظار فمثبت في جسم الجهاز ويمكن تحريكه ليدور حول محور الدائرة المذكورة غير أن المنظار يمكن أن

يدور معه تدريج الزوايا وبذا يمكن تسجيل حركة المنظار أما المنشور فيوضع على منضدة ويمكن إدارته بإدارة المنضدة حسب الحاجة.

قياس زاوية رأس المنشور باستخدام مقياس الطيف:

خطوات العمل:

نضبط كل من المنظار والمجمع للاستعمال فنبدأ في النظر خلال العينية لنرى السلك المتقاطع ونحرك العينية إلى أن نرى أوضح صورة للسلك مع ملاحظة أن ضبط العينية يتوقف على قوة نظر الشخص. نوجه المنظار نحو جسم بعيد وندير مسمار المنظار إلى أن نرى أوضح صورة لهذا الجسم. نضع مصدراً ضوئياً مثلاً مصباح بنزن أمام الفتة ونفتحها فتحة مناسبة، نوجه المنظار على امتداد المجمع بدون وجود المنشور وننظر إلى صورة الفتحة في المنظار نضبط المجمع بالاستعانة بالمسار م إلى أن تظهر أوضح صورة للفتحة والآن أصبح الجهاز معداً للعمل.



الشكل (19)

لقياس زاوية رأس المنشور نضع المنشور على منضدة ونوجه المجمع نحو رأس المنشور عمودياً على قاعدته تقريباً بحيث تسقط الأشعة من الفتحة كما هو مبين (الشكل 19). نحرك المنظار ليستقبل الأشعة المنعكسة على أحد الوجهين ونضبط

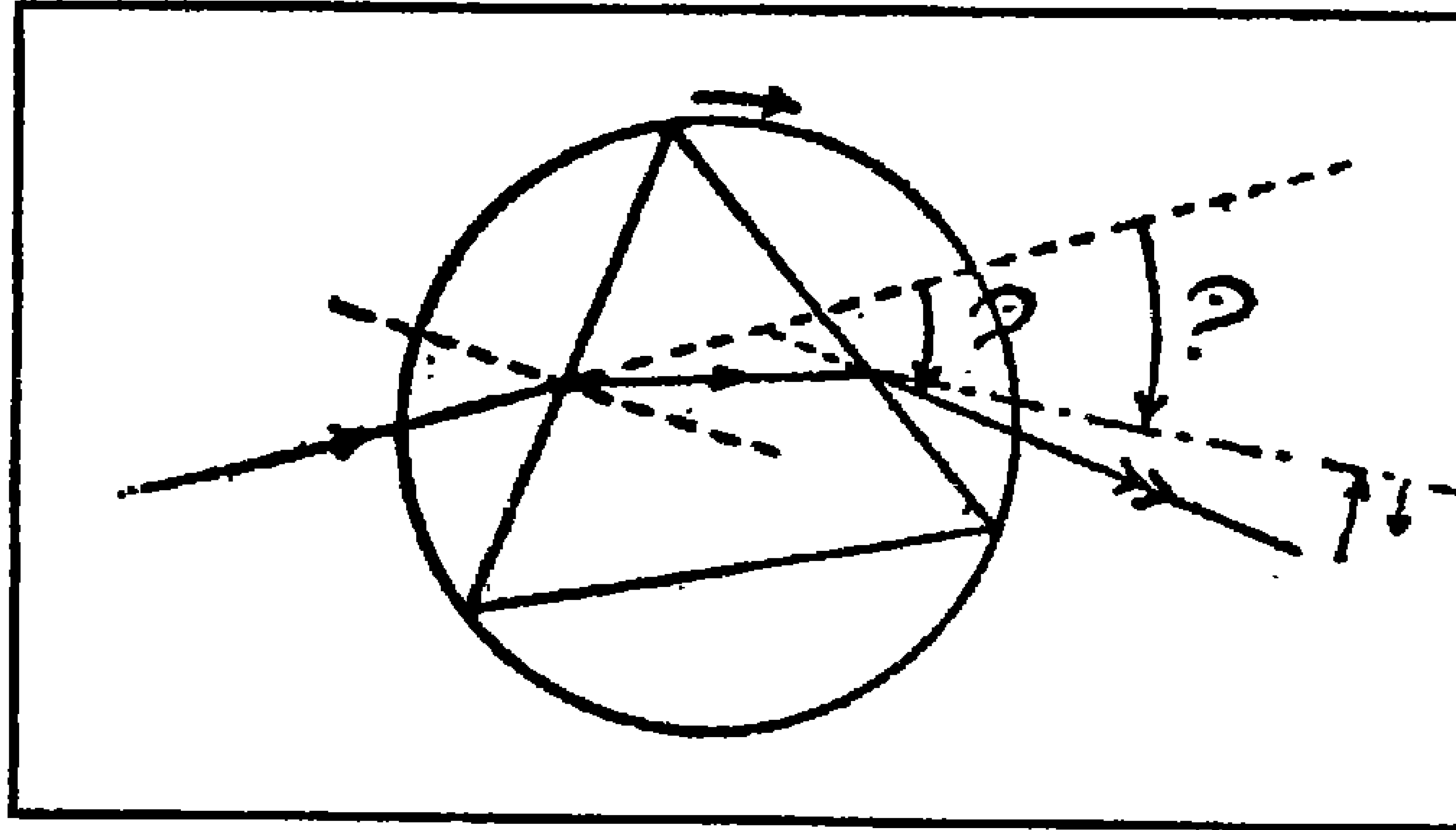
السلك المتقاطع على صورة الفتحة مع ملاحظة تضييقها ما أمكن. نقرأ التدريج في هذه الحالة. ننقل المنظار إلى الجهة الأخرى ونحدد وضع المنظار الجديد بقراءة الزاوية على التدريج. من القراءتين السابقتين يمكن حساب الزاوية التي بين الوضعين. نصف هذه الزاوية تعطى زاوية رأس المنشور.

ملحوظة:

يمكن أن تظهر صورتان أخرتان غير المتكونتين بالانعكاس متكونة بالانكسار ويبين ذلك الانكسار الخطوط المنقطة (الشكل 19) فيجب الاحتراس من استقبال هاتين الصورتين وفي العادة نجعل قاعدة المنشور مصنفرة لتلافي هذه الحالة.

إيجاد زاوية النهاية الصغرى للانحراف لضوء لهب الصوديوم:

نظرية التجربة:



(شكل 20)

نعلم أنه عندما تكون زاوية شعاع ساقط على منشور صغيرة فإن زاوية الانحراف تكون كبيرة ويمثل هذه الحالة (شكل 20). إذا أردنا أن تزيد زاوية السقوط تدير المنضدة التي يوضع عليها المنشور في اتجاه عقرب الساعة تدريجياً فنجد أنه يلزمنا لتتبع صورة الفتحة إدارة المنظار في اتجاه عكس عقرب الساعة وباستمرار إدارة المنضدة في نفس الاتجاه وتتبع صورة بالمنظار نصل إلى وضع نضطر لتغيير اتجاه المنظار، هذا

الوضع هو وضع النهاية الصغرى للانحراف ويلاحظ أنه في هذا الوضع يكون المنشور في وضع متماثل بالنسبة للمجمع والمنظار.

خطوات العمل:

نعد المنظار والمجمع للعمل كما في البند السابق ونضع مصباح بنزن أمام فتحة المجمع ونقرب مكعباً صغيراً من ملح الطعام من المنطقة الخارجية للهب فيتلون كله باللون الأصفر. نضع المنشور على المنضدة في وضع تكون فيه زاوية السقوط صغيرة ونحاول أن نرى صورة الفتحة بالمنظار، ندير المنضدة التي تحمل المنشور وفي نفس الوقت نتابع صورة الفتحة بالمنظار إلى أن نصل لوضع النهاية الصغرى للانحراف وعندها إذا أدرنا المنضدة التي تحمل المنشور يميناً أو يساراً فإن الصورة لا تتعدى تقاطع السلك في مجال رؤية العينية للمنظار. نثبت المنضدة في الوضع الذي تنطبق فيه صورة الفتحة على تقاطع السلك. نقرأ قيمة الزاوية التي يعطيها الجهاز أمام صفر الورنية ونستخدم قراءة الورنية للحصول على كسر الدرجة. نرفع المنشور ونضع المنظار على امتداد المجمع وننظر إلى الفتحة ونجعل الصورة على تقاطع السلك ونقرأ الزاوية. من القراءتين السابقتين نحسب زاوية الانحراف الصغرى.

إيجاد معامل انكسار مادة منشور لضوء وجد اللون:

نظرية التجربة:

لكل لون من ألوان الطيف معامل انكسار خاص بمادة المنشور فلإيجاد معامل الانكسار بالنسبة لضوء معين نوجد زاوية الانحراف الصغرى لهذا اللون وبالتعويض في القانون:

$$م = \frac{جا\frac{أ+ى}{2}}{جا\frac{أ}{2}}$$

ضبط مقياس الطيف بدون استخدام جسم بعيد:

شرحنا في بند سابق طريقة ضبط مقياس الطيف باستخدام جسم بعيد، غير أنه يمكن الاستغناء عن الجسم البعيد واتباع الطريقة الآتية في ضبط المقياس:

أضبط عينيه المنظار ثم أوجد وضع النهاية الصغرى للانحراف بالتقريب مستعملاً فتحة مناسبة، ركز الأشعة على السلك المتقاطع. حرك المنظار بحيث يزيد الانحراف (أي حرك المنظار جهة قاعدة المنشور). ثبت المقياس عندما تصبح صورة الفتحة عند حافة مجال الرؤية. أدر المنشور في نفس الاتجاه السابق لتصحيح صورة الفتحة في منتصف مجال الرؤية ويمكن أن نسمي هذا الوضع للمنشور بانوضع المائل. ركز الأشعة في المنظار في هذا الوضع. أدر المنشور في الاتجاه العكسي إلى أن تعود صورة الفتحة في وسط مجال الرؤية ويمكن أن نسمى وضع المنشور في هذه الحالة بالوضع المعتاد، ركز الأشعة في المجمع. كرر العمل السابق إلى أن نحصل على الوضع المضبوط وهو الوضع الذي يصبح فيه كل من المنظار والمجمع مضبوطاً.

ملاحظة:

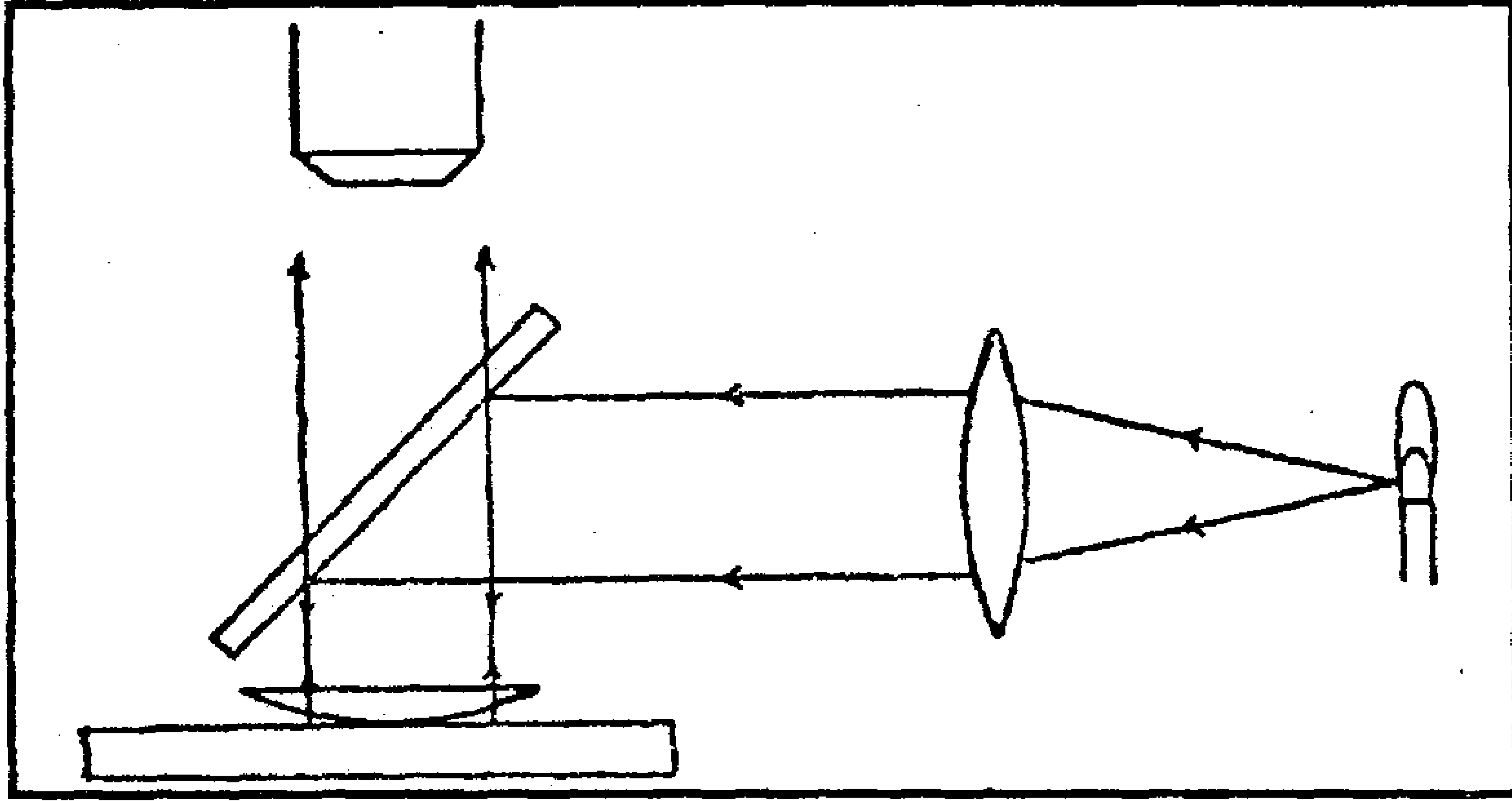
عندما نحرك رأس المنشور نحو المنظار نضبط المنظار وعندما نحرك رأس المنشور نحو المجمع نضبط المجمع.

قياس الطول الموجي لضوء أحادي اللون باستخدام حلقات نيوتن:

نظرية التجربة:

إذا وضعت عدسة لامة (محدبة مستوية) نصف قطر تكور وجهها المحدب كبير على لوح زجاجي سطحه الأعلى مستوٍ استواء ضوئياً وملامس لسطح العدسة المحدب، يحصر هذان السطحان بينهما طبقة رقيقة من الهواء يزيد سمكها تدريجياً من الداخل إلى الخارج. فإذا سقطت أشعة متوازية من ضوء أحادي اللون (مصباح صوديوم) على سطح العدسة في اتجاه عمودي عليه ثم نظرنا خلال ميكروسكوب

رأسي أعلى العدسة وعلى بعد مناسب منها (شكل 21). فإننا نرى بقعة مظلمة محاطة بهدب مستديرة (حلقات) متتالية من الضياء والظلمة (شكل 22). ونشترك هذه الحلقات في المركز وتتناقص المسافة بين كل حلقة وما تليها كلما ابتعدنا عن المركز وتسمى هذه الهدب بحلقات نيوتن.



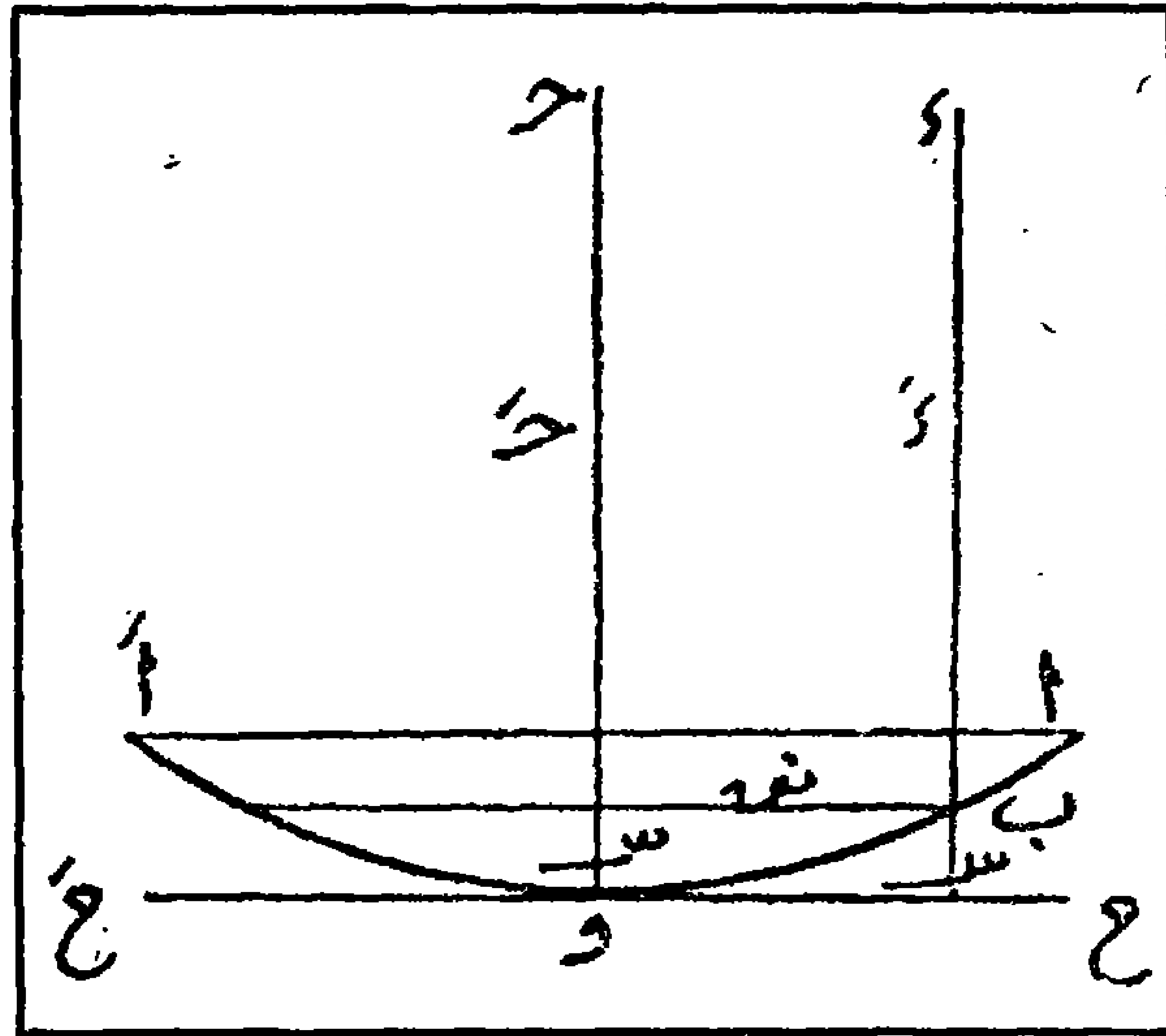
شكل 21



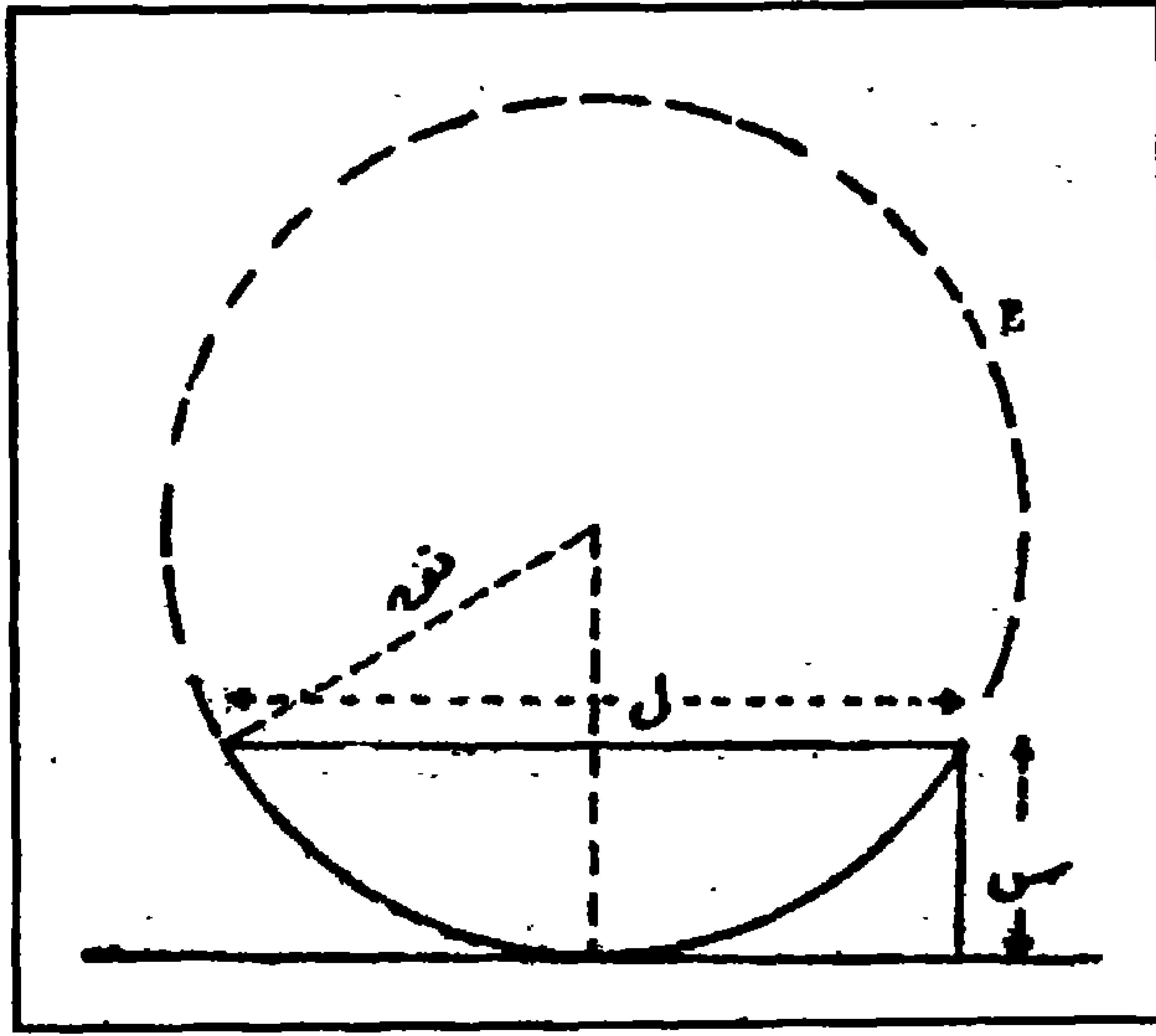
شكل 22

وتفسير هذه الظاهرة في الحالة الخاصة عندما تسقط أشعة رأسية متوازية على عدسة رقيقة كما يلي:

نعتبر أحد الأشعة الساقطة ء ءَ (شكل 22) ونفرض أنه نفذ من العدسة وقابل السطح المحدب الملامس لسطح الزجاج عند نقطة ب مثلاً فإن جزءاً منه ينعكس عند هذه النقطة وينفذ الجزء الآخر في وسط أقل كثافة ضوئية (الهواء) ثم يقابل سطح اللوح الزجاجي وينعكس عنده جزء منه إلى أعلى – يعترى هذا الجزء المنعكس تغير في الطور قدره ط لأن هذا الشعاع قبل انعكاسه يسير في وسط أقل كثافة ضوئية (الهواء) ويتجه نحو وسط أكثر كثافة ضوئية (الزجاج) – وعند خروج هذا الشعاع من الهواء ومقابلته سطح العدسة المحدب عند نقطة ب ينفذ منه ليخرج موازياً للشعاع الأصلي (أو منطبقاً عليه) ويحدث تداخل مع الشعاع الأول المنعكس عند ب وتكون نتيجة هذا التداخل أن نرى نقطة مظلمة في المركز تحيط بها حلقات مضيئة تفصلها عن بعضها البعض حلقات مظلمة (الشكل 23).



الشكل (23 أ)



الشكل (23 ب)

وبما أن الأشعة التي يحدث بينها التداخل مختلفة في الطور بمقدار ط كما سبق أن ذكرنا فإن الشرط اللازم لحدوث ظلمة هو.

2 م س حتا ك = ن λ

حيث λ هو طول موجة الضوء المستعمل

م معامل انكسار الضوء في مادة الغشاء

س سمك الغشاء الذي يسبب تكون الهدف (وهو في هذه الحالة الغشاء الهوائي المحصور بين العدسة واللوح الزجاجي)

ك زاوية انكسار الأشعة

وبما أن الأشعة عمودية ومادة الغشاء هي الهواء

∴ حتا ك = 1، م = 1

∴ الشرط اللازم لحدوث الظلمة هو:

2 س = ن λ

فإذا كان نصف قطر إحدى الحلقات المظلمة = نق

، نصف قطر تكور وجه العدسة المحدبة = نق

، سمك غشاء الهواء في موضع الحلقة = س

فمن (شكل 23 أ)

نق^2 = س (2 نق − س)

= 2 س نق باهمال س^2

∴ المعادلة (1) تصبح

$\frac{\text{نق}^2}{\text{نق}}$ = ن λ

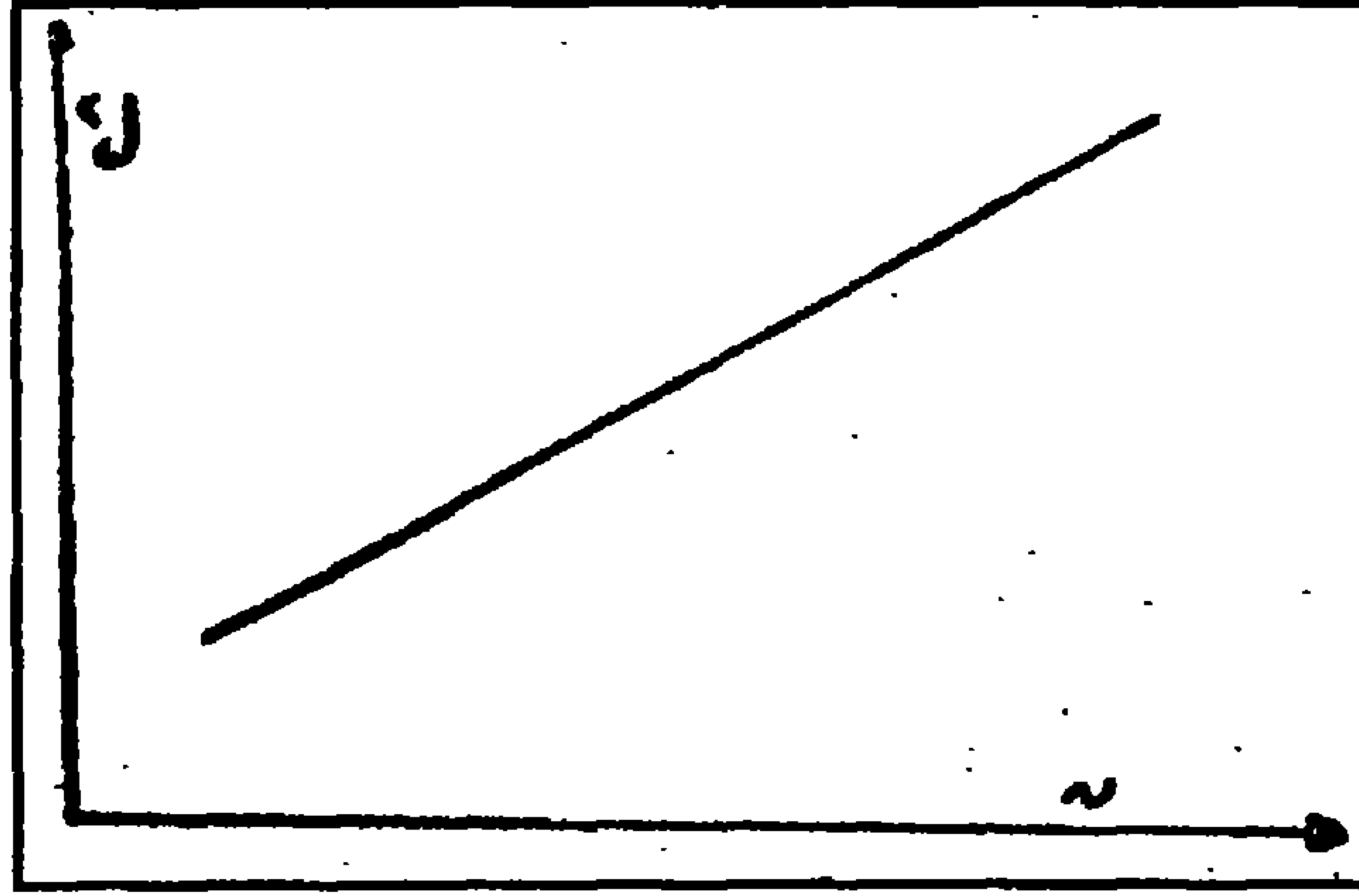
أي أن نق^2 = ن λ نق

وبفرض أن نق ن ترمز إلى نصف قطر حلقة ترتيبها ن

فإن نق^2 ن = ن λ نق

أي نق ن = $\sqrt{\text{ن} \lambda \text{ نق}}$

وهذه المعادلة تعني أن مربع نصف القطر (أو القطر) يتناسب مع رتبة الحلقة ويمثل (شكل 24) هذه العلاقة بيانياً.



الشكل (24)

ويفرض حلقة أخرى رتبتها ن + ر فإنه يمكن استنتاج أن:

$$\text{نق}^{2}_{\text{ن}+\text{ر}} - \text{نق}^{2}_{\text{ن}} = \text{ر}\,\lambda\,\text{نق}$$

$$\therefore \lambda = \frac{\text{نق}^{2}_{\text{ن}+\text{ر}} - \text{قن}_{\text{ن}}}{\text{ر}_{\text{نق}}}$$

إذا أريد استعمال قطر الحلقة ق بدل نصف القطر وهو الأسهل عملياً يصبح القانون السابق.

$$\lambda = \frac{\text{ق}^{2}_{\text{ن}+\text{ر}} - \text{ق}^{2}_{\text{ن}}}{4\text{ر}\ \text{نق}}$$

ويمكن تعيين ق ن + ر، ق ن، ر من الرسم البياني أما نق نصف قطر تكور وجه العدسة الملاصق للوح الزجاج فيلزم تعيينه بإحدى الطرق المعرفة.

خطوات العمل:

يهيأ الجهاز كما هو موضح (شكل 20) وننظر خلال الميكروسكوب نرى حلقات نيوتن. ويجب أن نراعي أن يكون الميكروسكوب واقعاً في المستوى الرأسي المار بأحد أقطار الحلقات ثم نحركه في اتجاه أفقي حتى نرى نقطة تقاطع السلكين المتعامدين في عينيه الميكروسكوب منطبقة على محيط إحدى الحلقات المظلمة ولتكن العاشرة مثلاً

ونأخذ قراءة الورنية الدالة على موضع الميكروسكوب. ثم نحرك الميكروسكوب نحو الجهة الأخرى إلى أن نرى نقطة تقاطع السلكين المتعامدين منطبقة على محيط الحلقة التاسعة ونأخذ قراءة الورنية وهكذا إلى أن نصل إلى الحلقة الأولى وهي المحيطة مباشرة بالبقعة المظلمة وهكذا نستمر في تحريك الميكروسكوب لنأخذ قراءات الورنية ونقطة تقاطع السلكين المتعامدين في عينية الميكروسكوب منطبقة بالتتالي على محيطات الحلقات المظلمة وبذلك يمكن إيجاد أقطار الحلقات. ندون النتائج في جدول ومنه نحسب أقطار الحلقات ق، مربع هذه الأقطار ق2 ورتبة الحلقة ن. نرسم خطاً بيانياً للعلاقة بين ن، ق2. نوجد نصف قطر تكور العدسة نق بإحدى الطرق المعروفة. ثم نحسب طول موجة ضوء الصوديوم المستعمل λ بتطبيق القانون.

القراءات:

رتبة الحلقة ن	قراءة الورنية		قطر الحلقة ق	مربع قطر الحلقة ق2
	الميكروسكوب جهة اليمين	الميكروسكوب جهة اليسار		
1 2 3 0 0				

ملحوظة:

إذا أريد مراعاة الحلقات المضيئة فإن الشرط اللازم لحدوث إضاءة هو:

$$2\ \text{م س حتا ك} = (\text{ن} + \frac{1}{2})\ \lambda$$

في حالة الهواء وسقوط الضوء عمودياً يؤول الشرط السابق إلى:

$$2\text{ س} = \left(\text{ن} + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

بالتعويض عن 2 س بما تساويه بدلالة قطر الحلقة ينتج أن.

$$\frac{\text{ق}^2}{4\text{ نق}} = \left(\text{ن} + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

ولذا قطر الحلقة النونية ق ن يتعين من:

$$\frac{\text{ق}_{\text{ن}}^2}{4\text{ نق}} = \left(\text{ن} + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

والحلقة ق ن + ر يتعين من:

$$\frac{\text{ق}_{\text{ن+ر}}^2}{4\text{ نق}} = \left[(\text{ن} + \text{ر}) + \frac{1}{2}\right]\lambda$$

$$\therefore \lambda = \frac{\text{ق}_{\text{ن+ر}}^2 - \text{ق}_{\text{ن}}^2}{4\text{ر نق}}$$

وهو نفس القانون في حالة الحلقات المظلمة.

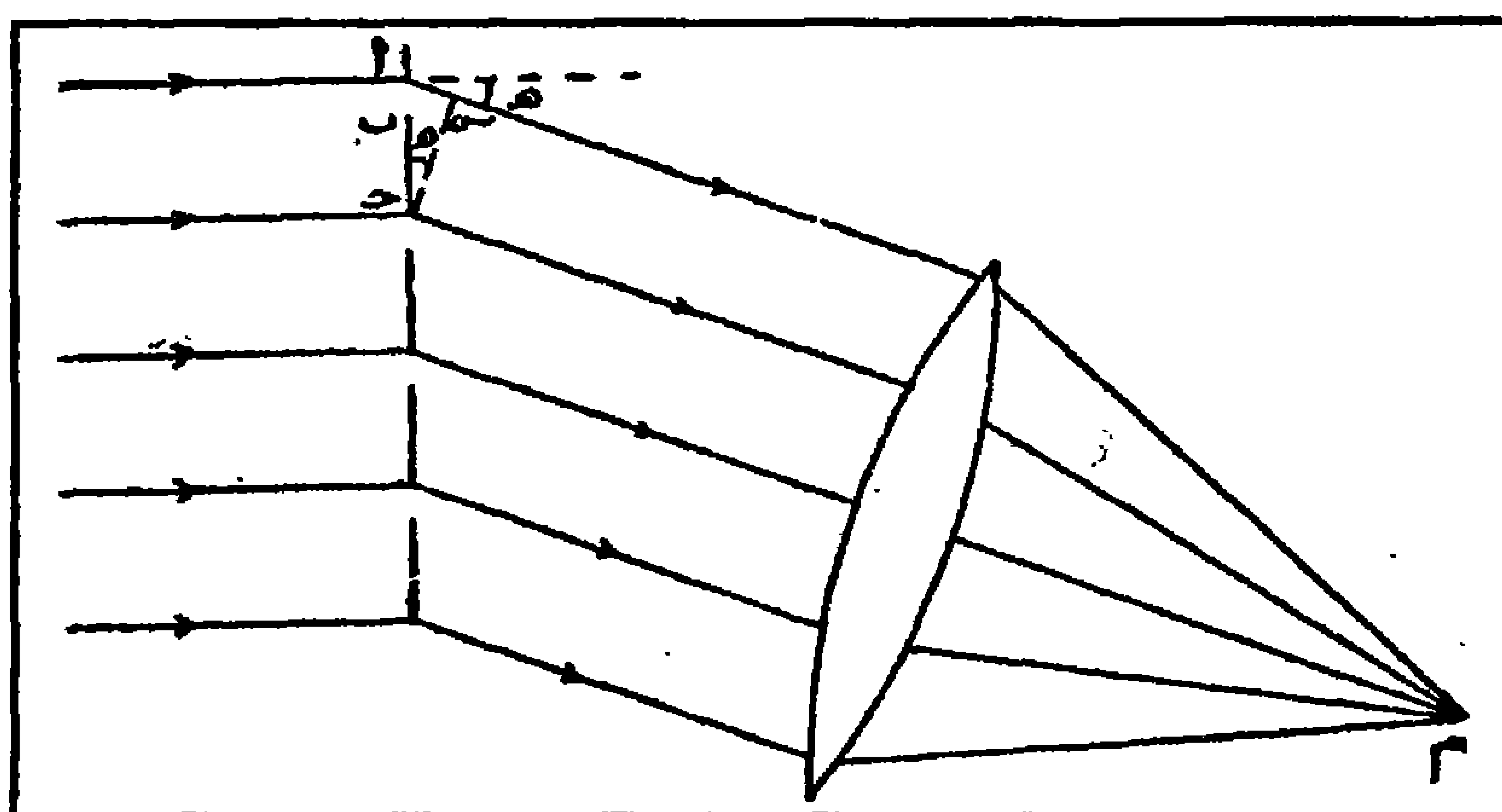
إيجاد الطول الموجى لضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود:

نظرية التجربة:

يتكون محزوز الحيود من لوح زجاجي خدشت عليه بواسطة قطعة من الماس مستقيمات متوازية على أبعاد متساوية يصل عددها إلى حوالي 20.000 خط أو يزيد في البوصة الطولية. مواضع الخدش هذه غير منفذة للضوء أما المسافات بينها فينفذ منها الضوء. أي أن هذه الخدوش تكون بمثابة حواجز معتمة.

ويتوقف عمل المحزوز على حيود الضوء عند نفاذه من عدة فتحات متوازية فإذا فرضنا أ ب، جـ د، و ر (شكل 25) هي الفتحات التي ينفذ خلالها الضوء أما

المسافات المحصورة بينها ب حـ، ء و ... فإنها تدل على الخدوش. فعند وضع المحزوز على منضدة سبكترسكوب ووجه إليه الضوء أحادي اللون (من مصباح صوديوم مثلاً) بحيث يسقط عمودياً عليه فإن معظم الضوء ينفذ على استقامته وجزء منه يحيد عن هذه الاستقامة وينتشر في جميع الجهات. ويبين (شكل 25) مسير الأشعة النافذة من المحزوز بعد أن حادت عن استقامتها بزاوية قدرها هـ وسقطت على شيئية التلسكوب لتجمعها في نقطة م. فإذا اعتبرنا شعاعين نافذين من فتحتين متجاورتين بحيث يمران بنقطين متناظرتين فيهما مثل الشعاعين المارين بالنقطتين أ، جـ فإنهما عند وصولهما إلى أ، جـ يكونان في طور واحد.



إذا أسقطنا العمود حـ س من حـ على الشعاع النافذ عند أ فإن الزمن الذي يأخذه أحد الشعاعين ليصل من س إلى م يساوي الزمن اللازم للآخر ليصل من حـ إلى م.

∴ فرق المسير بين الشعاعين = أ س

ولكن أس = أ حـ حا هـ

[حيث أ حـ = أ ب + ب حـ أي عرض الفتحة مضافاً إليه البعد بين الفتحتين وتسمى هذه المسافة وحدة محزوز الحيود ولنرمز لها بالرمز ف].

∴ أ س = ف حـ هـ

فإذا كان فرق المسار بين الشعاعين المتناظرين النافذين من فتحتين متجاورتين تساوي عدداً كاملاً من الموجات فإن الأشعة النافذة من فتحة تقوى نظائر النافذة من الفتحة المجاورة لها ويحدث إضافة عند م والشرط اللازم لحدوث الإضاءة هو.

ف جا هـ = ن λ

حيث λ هو طول موجة الضوء المستعمل، ن عدد صحيح. ويلاحظ أن زاوية هـ تأخذ قيم مختلفة عندما تأخذ ن القيم 1، 2، 3 ... وهذا يدل على أن هناك مواضع معينة يأخذها التسلكوب الذي يستقبل الأشعة المحزوز ترى فيها صورة فتحة مجمع الاسبكتر وسكوب مضاءة بضوء الصوديوم منطبقة على السلكين المتعامدين في عينية التلسكوب، هذه المواضع تسمى المرتبة الأولى والمرتبة الثانية.. حيث ن = 1، ن = 2، .. وهكذا.

فإذا جعل التلسكوب عمودياً على المحزوز شوهدت صورة لفتحة مجمع الاسبكتروسكوب منطبقة على السلكين المتعامدين في عينية التلسكوب وهي الصورة المتكونة بالأشعة النافذة على استقامة الضوء الساقط وإذا جعل التلسكوب مائلاً في اتجاه الأشعة الساقطة بقيمة معينة لزاوية هـ تحقق المعادلة الآتية:

ف جا هـ = λ

شوهدت صورة لفتحة المجمع منطبقة على السلكين المتعامدين في عينية التلسكوب وهي المرتبة الأولى للصور المتكونة بالحيود، ونشاهد المرتبة الثانية إذا تحققت المعادلة:

ف جا هـ = 2 λ

وفي المرتبة الثالثة:

ف حا هـ = 2 λ وهكذا

وبتطبيق المعادلة:

ف جا هـ = ن λ

يمكن حساب طول الموجة، أما ف فتعرف من عدد الخطوط الموجودة في السنتمتر الطولي من المحزوز وهو مدون على المحزوز نفسه.

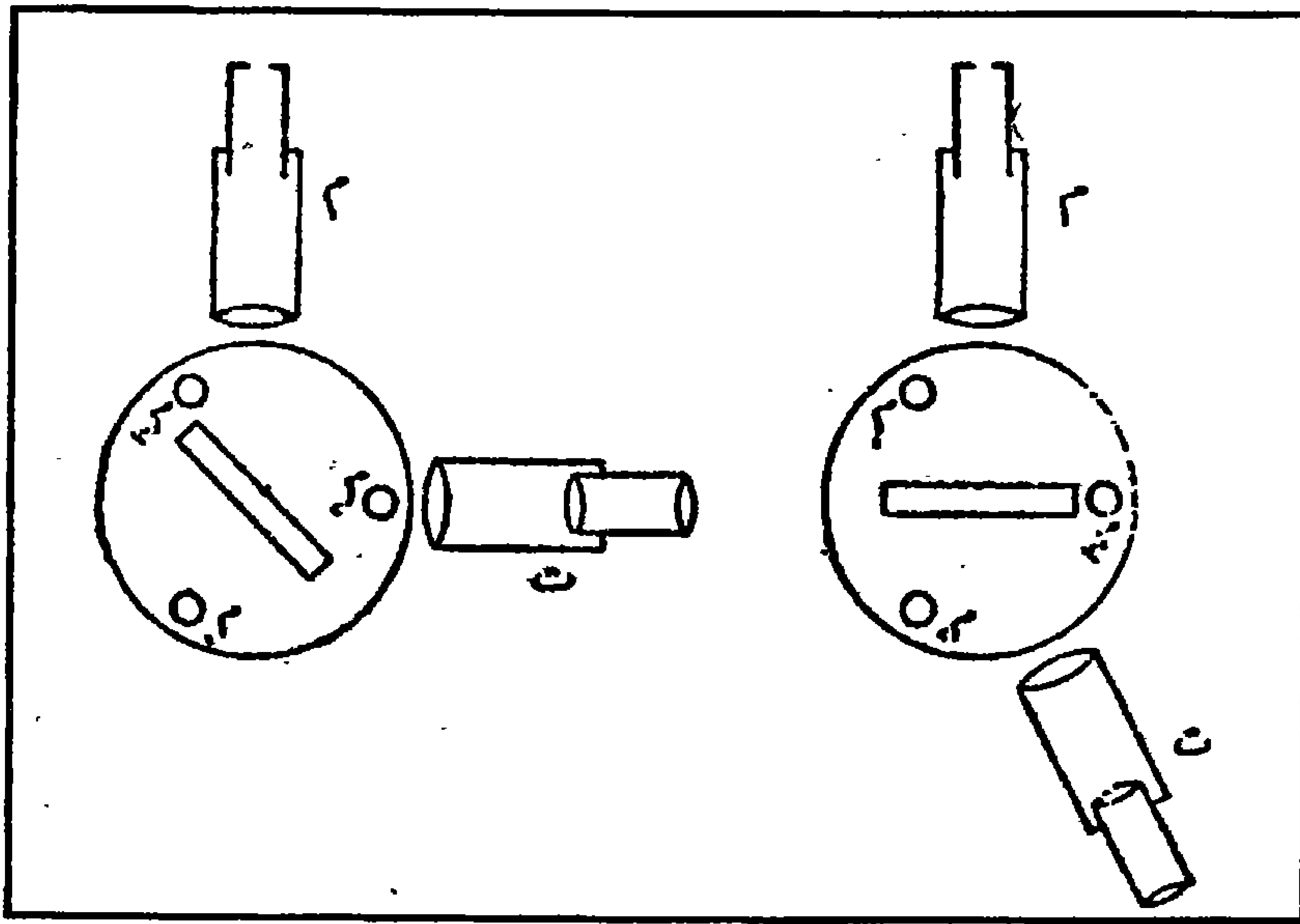
خطوات العمل:

نجعل التلسكوب معد لاستقبال أشعة متوازية وذلك بأن ننزعه من مكانه وننظر إلى جسم بعيد ثم نضع التلسكوب مكانة بحيث يكون على استقامة المجمع الذي تضاء فتحته بمصباح الصوديوم ويكون معداً لإصدار أشعة متوازية (بتغيير البعد بين فتحته والعدسة) ثم نضع محزوز الحيود على منضدة الاسبكتر وسكوب بحيث يصبح وجهه عمودياً على محور المجمع وتوازي محزوزاته المحور الذي يدور حوله التلسكوب.

ولضبط محزوز الحيود يوضع المصدر الضوئي أمام فتحة المجمع ثم يثبت المحزوز فوق النضد المتحرك بواسطة الماسك المعد لذلك بحيث يتعامد وجهه مع الضلع $م_1 م_2$ من المثلث الذي تكونه مسامير التسوية $م_1$، $م_2$، $م_3$ المبينة في (شكل 26).

يدار التلسكوب بعد ذلك حتى يتعامد مع محور المجمع تقريباً. ثم يدار النضد المتحرك حتى نشاهد صورة لفتحة المجمع المنعكسة عن سطح المحزوز خلال عينية التلسكوب ويحرك المسماران $م_1$، $م_0$ حتى يمر منتصف الشعرتين المتعامدتين بمنتصف صورة الفتحة.

تحرك المنضدة بعد ذلك كما في الشكل 26 ثم يدار التلسكوب لمشاهدة موضع الضياء في مرتبته الأولى أي لمشاهدة موضع أول صورة لفتحة المجمع على أحد جانبي محور المجمع ويحرك المسمار $م^2$ حتى تمر نقطة تقاطع الشعرتين بمنتصف الصورة التي تبدو واضحة، بهذا يمكن ضبط محزوز الحيود بحيث يتعامد وجهه مع محور المجمع.



الشكل 26

يعد موضع التلسكوب بحيث يتعامد وجهه مع محور الجمع. ثم يدار النضد المتحرك حتى يرى منتصف صورة الفتحة المنعكسة عند سطح المحزوز واقعاً على نقطة تقاطع الشعرتين. يكون في هذا الوضع وجهه المحزوز مائلاً بزاوية 45° مع محور التلسكوب والمجمع، تدار النضد بعد ذلك خلال زاوية قدرها 45° فيصبح وجه المحزوز متعامداً مع محور الجمع.

تعيين الطول الموجي:

يدار التلسكوب حتى يصبح محوره منطبقاً مع محور الجمع ونشاهد صورة الفتحة، بعد ذلك يدار التلسكوب جهة اليمين أو اليسار مع محور الجمع حتى نرى أول صورة للفتحة وهي صورة الفتحة عند المرتبة الأولى وندون قراءة المقياس الدائري في هذا الوضع. نستمر في إدارة التلسكوب في نفس الاتجاه حتى تظهر صورة الفتحة عند المرتبة الثانية ونسجل قراءة المقياس الدائري التي تدل على موضع التلسكوب. نكرر نفس الخطوات في الجهة الأخرى من محور الجمع وندون النتائج في جدول.

نحسب قيمة ثابت محزوز الحيود وتساوي مقلوب عدد الخطوط في السنتمتر ويكون عادة مدون على المحزوز، نطبق القانون:

ف جا هـ = ن λ

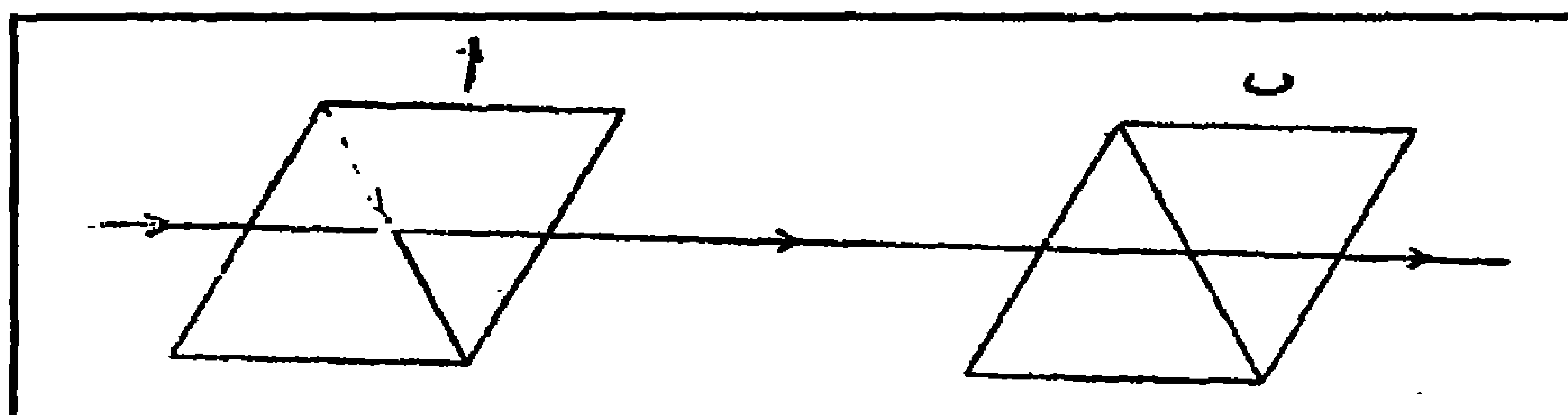
القراءات:

مرتبة الصورة ن	قراءة المقياس الدائري التي تدل على موضع التلسكوب		زاوية الحيود هـ
	يمين المجمع	يسار المجمع	

طول الموجة نحصل عليه من المعادلة:

ف جا هـ = ن λ

تعين درجة تركيز محلول سكري باستخدام مقياس الاستقطاب:



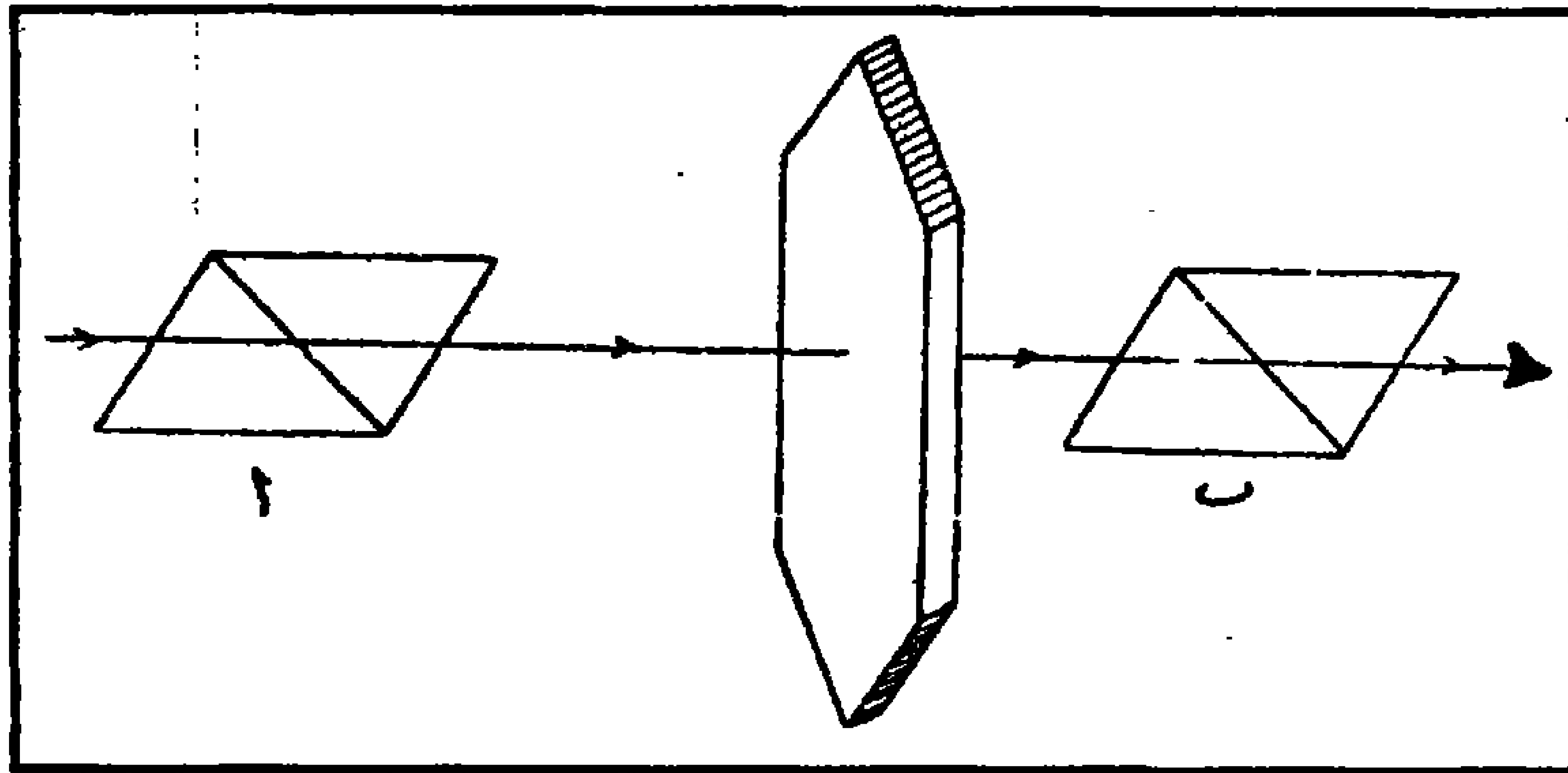
شكل 27

نظرية التجربة:

إذا سقط شعاع ضوئي على منشور نيكول Nicol Prism فإنه ينفذ منه مستقطباً أي أن اهتزازاته تكون في مستوى واحد ويقال لهذا الشعاع أنه مستقطب استقطاباً

إستوائياً وإذا سقط الشعاع بعد ذلك على منشور آخر (شكل 27) نفذ منه إذا كان المستوى الرئيس للمنشور الثاني يوازي المستوى الرئيس للمنشور الأول ونفذ جزء من اهتزازاته إذا كان المستوى الرئيسي له يميل على المستوى الرئيسي للمنشور الأول بزاوية حادة ويمتنع نفاذ الشعاع إذا كان المستوى الرئيسي للمنشور الثاني عمودياً على المستوى الرئيسي للمنشور الأول ويقال للمنشورين أنهما متعامدين في هذه الحالة، ويسمى المنشور الأول المستقطب أما الثاني فيسمى المحلل.

فإذا كان المنشوران المستقطب والمحلل متعامدين ثم نظرنا إلى مصدر ضوئي خلال المحلل رأينا ظلمة أما إذا وضع لوح من الكوارتز بين المنشورين (شكل 28) أصبحت الظلمة ضياء بمعنى أن شعاع الضوء المستقطب الذي لم ينفذ من المحلل قبل وضع لوح الكوارتز أصبح نافذاً بعد وضعه وإذا أدير المحلل حول الشعاع الساقط عليه كمحور بزاوية معينة أخذ وضعاً ينعدم فيه نفاذ الضوء المستقطب مرة أخرى فنرى الظلمة ثانياً ويفسر هذا بأن لوح الكوارتز أدار مستوى استقطاب الضوء، والزاوية التي أدار بها هذا المستوى تساوي الزاوية التي دار بها المحلل ويقال أن الكوارتز عمل على دوران مستوى الاستقطاب وتسمى المواد التي تعمل على دوران مستوى الاستقطاب بالمواد الفعالة ضوئياً.



(شكل 28)

ومن المواد الفعالة ضوئياً ما يدير مستوى الاستقطاب في اتجاه ومنها ما يديره في الاتجاه المضاد. فإذا كان دوران مستوى الاستقطاب في اتجاه حركة عقرب الساعة تسمى المادة يمينية المدوران أما إذا كان في عكس اتجاه عقرب الساعة سميت المادة يسارية الدوران.

ويتوقف مقدار الزاوية التي تدير بها مادة فعالة مستوى الاستقطاب على سمك هذه المادة إذ تتناسب طردياً مع هذا السمك، وعلى كثافة هذه المادة إن كانت صلبة أو كتلة المادة الفعالة في السنتميتر المكعب من المحلول إن كانت مذابة، وعلى طول موجة الضوء المستخدم وكذلك درجة الحرارة.

وتسمى الزاوية التي تدير بها مادة مستوى الاستقطاب إذا اخترق الضوء فيها سمكاً قدره 10 سم وكانت كثافتها الوحدة أو درجة تركيز المحلول الوحدة بالدوران للنوعي لهذه المادة.

وتكون الزاوية التي تدير بها المادة مستوى الاستقطاب عندما يخترق الضوء فيها سمكاً قدره "ل" بفرض أن كثافتها أو درجة تركيز المحلول الوحدة =

و × $\frac{ل}{10}$ حيث "و" هي الدوران النوعي للمادة.

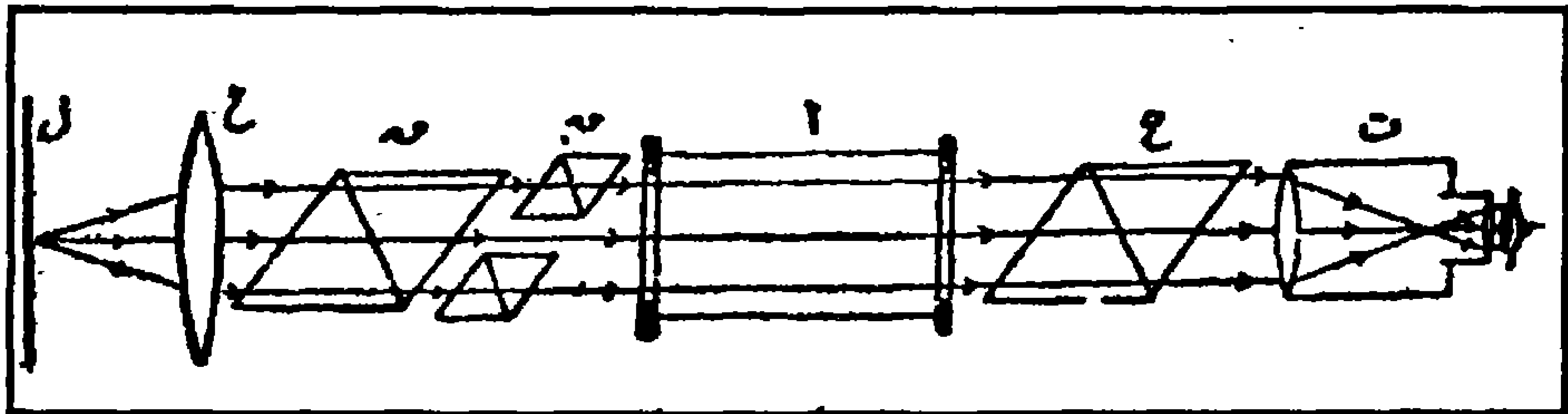
فإذا كانت ث هي كثافة المادة أو درجة تركيز المحلول.

∴ الزاوية التي تدير بها المادة مستوى الاستقطاب.

$$= و \times \frac{ل\ ث}{10}$$

فإذا عرف الدوران النوعي "و" للسكر المذاب في المحلول وكان سمك المادة هو ل وقيست زاوية الدوران هـ أمكن إيجاد تركيز المحلول. هناك أجهزة تستخدم لإيجاد درجة تركيز المحلول السكري يتوقف عملها على ظاهرة الاستقطاب وتسمى مقاييس الاستقطاب أو مقاييس السكر Palarimeter of Saccrameter.

ويتكون مقياس الاستقطاب كما في الشكل (29) من منشوري نيكول (ق، ح) أحدهما ق المستقطب والثاني ح المحلل موضوعين على جانبي أنبوبة أفقية آ وعلى استقامة محورها والأنبوبة تملأ بالسائل المراد إيجاد زاوية دورانه لمستوى الاستقطاب حيث يسد فتحتها قرصان رقيقان من الزجاج ويصدر الضوء من مصباح أحادي اللون وينفذ الضوء من فتحة ضيقة في حائل ثم يسقط على عدسة محدبة ع فإذا كانت الفتحة في بؤرة العدسة نفذ الضوء من الأخيرة كحزمة من الأشعة المتوازية تسقط على المنشور "ق" ويوجد منشوران (من منشورات نيكول) ق1، ق2 مثبتان داخل أسطوانة من النحاس الأصفر وموضوعان أمام هذا المنشور بحيث يكون مستواهما الرئيسيان متوازيين ولا يوازيان المستوى الرئيسي للمنشور ق بل يميلان عليه بزاوية صغيرة فالضوء النافذ من مجموعة المنشورات ق، ق1، ق2 تكون فيه ثلاثة اهتزازات، اثنان منهما تنفذان من المنشور "ق" وأحد المنشورين ق1 أو ق2 أما الثالثة فتنفذ من المنشور "ق" وحده.

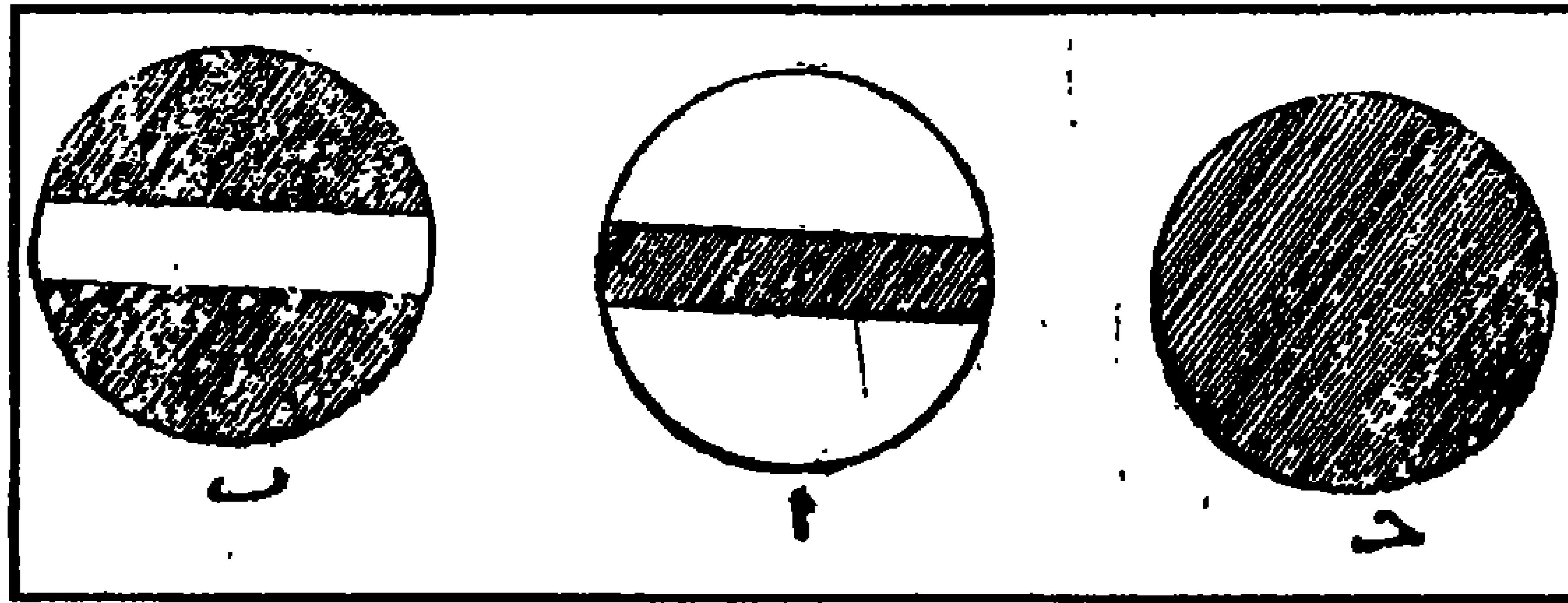


الشكل 29

فإذا كان المنشور المحلل ح في وضع يكون فيه مستواه الرئيسي موازياً لمنصف الزاوية بين أحد الاهتزازين الأولين والاهتزازة الثالثة ظهر مجال الرؤية مضاء بإضاءة واحدة (الشكل 30) أما في الأوضاع الأخرى للمنشور فيظهر مجال الرؤية منقسماً إلى ثلاثة أجزاء فإما أن يكون الجزءان الجانبيان أكثر إضاءة من الجزء الأوسط كما في آ أو الجزء الأوسط أكثر إضاءة من الجزئين الجانبين كما في "ب" وعند استعمال الجهاز لقياس الزاوية التي تديرها مادة مستوى الاستقطاب تملأ الأنبوبة حـ بالماء المقطر أولاً ويدار

المنشور المحلل إلى أن يأخذ الوضع الذي يظهر فيه مجال النظر بإضاءة واحدة ثم يفرغ الماء وتملأ الأنبوبة بالمحلول ويدار المنشور المحلل إلى أن يظهر مجال الرؤية بإضاءة واحدة مرة أخرى والزاوية المحصورة بين وضعي المنشور تكون هي الزاوية التي دار بها مستوى استقطاب الضوء.

ويرى مجال الرؤية خلال تلسكوب "ت" يكون مضبوطاً على المستوى المار بالطرفين الأيمنين للمنشورين ق1، ق2 أما موضع المنشور المحلل ح فيقرأ على مقياس من الزجاج مدرج إلى درجات ستينية ينظر إليه خلال قطعة العينية ويضاء المقياس بمصباح كهربائي.



الشكل 30

خطوات العمل:

تملأ الأنبوبة آ بالماء المقطر وتسد بغطائها بحيث تكون خالية من فقاعات الهواء ثم نضعها مكانها وندير المنشور المحلل إلى أن يصبح مجال الرؤية مضيئاً بدرجة واحدة ونقرأ موضع المنشور على المقياس. نفرغ الأنبوبة ونملؤها بالمحلول المراد إيجاد درجة تركيزه بحيث لا يكون بها فقاعات هواء ونكرر نفس العمل السابق إلى أن يصبح مجال الرؤية مضاء بدرجة واحدة ونقرأ موضع المنشور على المقياس. الفرق بين القراءتين يكون الزاوية التي أدار بها المحلول مستوى الاستقطاب.

بمعرفة طول الأنبوبة آ والدوران النوعي للمادة المذابة في المحلول (من الجداول) يمكن إيجاد درجة تركيز المحلول.

اسئلة

س1: توضع حلقة معدنية عمودياً على خطوط القوة لتحريض مغناطيس منتظم شدته 0.1 تسلا احسب القوة المؤثر على طول كل سم من هذه الحلقة حين يجتازها تيار شدته 40 أمبير.

الجواب: 0.04 نيوتن.

س2: يجتاز ناقلين مستقيمين ومتوازيين يبعد احدهما عن الآخر بمقدار 2سم تياران كهربائيان، جهتهما واحدة وشدتاهما 3.2 أمبير على الترتيب. عين شدة وجهة القوة التي يؤثر بها التيار الاول على طول 10 سم من التيار الثاني.

الجواب: 9×10^{-6} نيوتن.

س3: تتألف وشيعة مساحة مقطعها 15سم^3، من 500 لفة يجتازها تيار شدته 3 أمبير، وضعت هذه الوشيعة في مجال تحريضي شدته 0.12 تسلا بصورة توازي معها خطوط القوة محر الوشيعة وتدخل في وجهها الشمالي.

1. إذا كان بإمكان الوشيعة ان تدور حول محور قائم مار من مركزها، فما العمل الناتج من حركتها؟
2. تدور الوشيعة 80 دورة في الدقيقة ويفرض ان جهة التيار تنعكس كل نصف دورة فما الاستطاعة الناتجة؟

الاجوبة: 0.54 جول، 1.44 واط.

س4: وضع إطار مقياس غلفاني في مجال تحريضي 0.04 تسلا. فإذا كان طوله 3سم وعرضه 2سم وقد لف حوله 100 لفة:

1. ما القوى التي تؤثر به عندما يجتازه تيار شدته 4 ميلي أمبير؟
2. ما عزم مزدوجة هذه القوى؟
3. ما مقدار الزاوية التي يدورها إذا كانت ثابتة فتل سلك التعليق 48×10^{-6}م × نيوتن في الراديان؟

الاجوبة: 48×10^{-5} نيوتن، 0.96×10^{-5}م × نيوتن، 12 درجة.

الفصل العاشر

التحريض الكهرطيسي

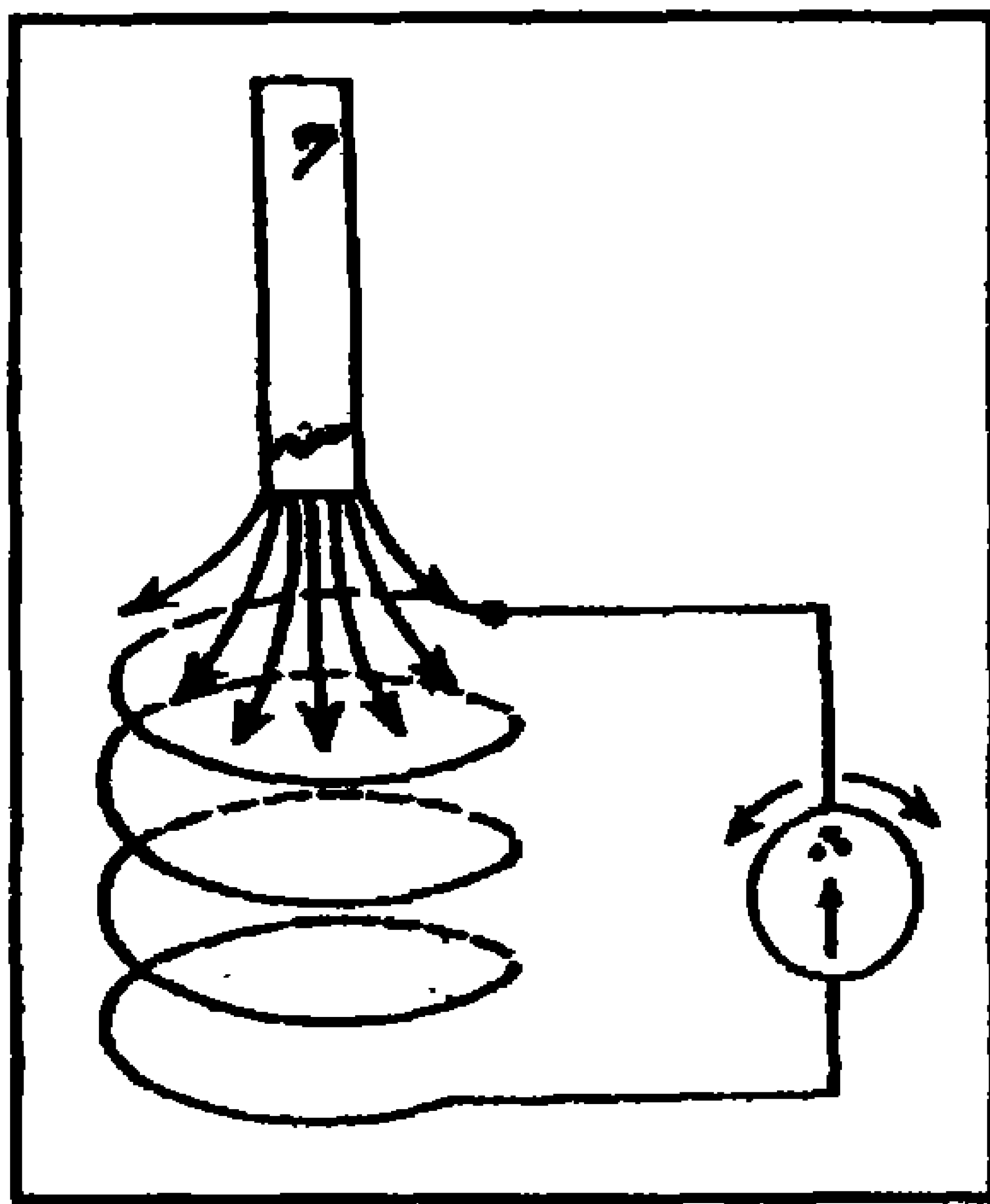
الفصل العاشر

التحريض الكهرطيسي

الدراسة الوصفية:

تجربة فراداي في حادثة التحريض (تجربة اساسية):

نصل طرفي وشيعة بمربطي مقياس غلفاني، صفر تدريجه في المنتصف، بحيث ينحرف المؤشر دالاً على جهة التيار وعلى شدته. ونقرب منها وبسرعة قطباً شمالياً ش لقضيب مغناطيسي (الشكل 1)، فنرى إبرة المقياس تنحرف انحرافاً وقتياً حسب السهم (1) يدوم مادام المغناطيس عادت إبرة المقياس إلى الصفر، وكلما تم التقريب في زمن أقل كان انحراف الإبرة أكبر.



الشكل (1)

وإذا أبعدنا القطب الشمالي عن الوشيعة، وبسرعة نلاحظ إبرة المقياس تنحرف انحرافاً مخالفاً للسابق حسب السهم (2)، مادام المغناطيس يبتعد، وتعود إلى الصفر إذا سكن المغناطيس وكلما تم التبعيد في زمن أطول كان انحراف الإبرة أصغر.

فانحراف إبرة المقياس يدل على مرور تيار ش في دارة الوشيعة والمقياس، مع أن هذه الدارة لا تحوي بيلاً ولا مدخرة ولا أي مولد كهربائي، وعليه يكفي تقريب أو

تبعيد (تحريك) مغناطيس من وشيعة لنهيج فيها تياراً كهربائياً. تسمى هذه الحادثة المهمة التي اكتشفها فاراداي سنة 1831 حادثة التحريض الكهرطيسي، ويسمى التيار المتولد عنها التيار المتحرّض والمغناطيس الذي هيّج هذا التيار المحرّض وتسمى الوشيعة المتحرّض.

أما تفسير هذه الحادثة فهو أن الوشيعة يخترقها تدفق مغناطيسي يبعثه المغناطيس إليها، وعند اقتراب المغناطيس منها يزداد هذا التدفق، وعند ابتعاده عنها ينقص هذا التدفق، وعليه فإن تغير التدفق المغناطيسي من دارة ما هو السبب في توليد التيار المحرض. واستناداً إلى ذلك أعطى فاراداي قانونه في التحريض الكهرطيسي والذي يجيب عن السؤال التالي "متى يتولد التيار المتحرض" والذي ينص عليه كما يلي:

يتولد التيار المتحرض في دارة مغلقة، إذا تغير التدفق المغناطيسي الذي يجتازها، ويدوم ما دام هذا التغير.

تجارب في التحريض الكهرطيسي:

إن القانون يؤكد أن تغير التدفق هو السبب في توليد التيار المتحرض، ولما كان التدفق يعطى بالدستور:

نق = ح سط تجب هـ

فإن تغيره ينتج عن تغير شدة المجال المغناطيسي ح، أو عن تغير مساحة السطح الكلي سط الذي يخترقه التدفق، أو عن تغير الزاوية هـ أي عن تغير وضع السطح في المجال، وسنذكر فيما يلي تجارب توضح كلاً من هذه المحاولات.

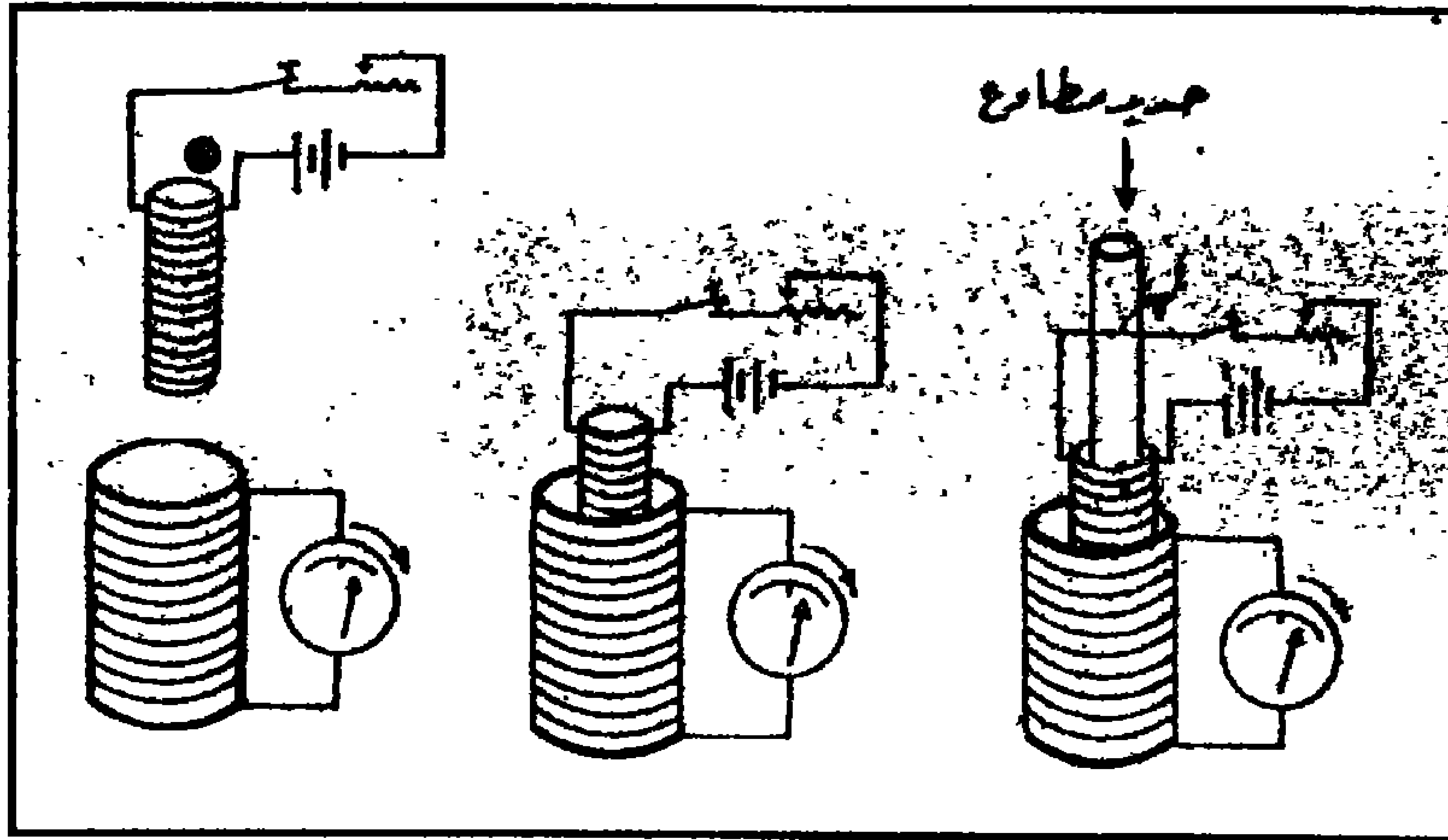
أ. التحريض الكهرطيسي ناتج عن تغير شدة التحريض المغناطيسي:

في التجربة الأساسية التي أوردناها في البند السابق، كان تغير التدفق من الوشيعة ناتجاً عن تغير شدة المجال ح الذي يولده المغناطيس، والذي يكون شديداً بجوار القطب

المغناطيسي، فيؤدي اقتراب المغناطيس إلى زيادة، وابتعاد المغناطيس إلى نقصانه وينتج عن ذلك تياران في جهتين متعاكستين.

ويمكن كما نعلم، أن نحصل على مجال مغناطيسي بوساطة تيار نمره في وشيعة، وأن نغير في شدة المجال لمغناطيسي إما بتغيير شدة التيار في الوشيعة وإما بإدخال نواة حديد في هذه الوشيعة عامل انفاذها فا، فيصبح المجال داخلها ض = فا × ح، وهذا التغيير في التدفق يؤدي إلى توليد تيار متحرض كما في التجربة التالية:

نأخذ وشيعة حـ ونضعها على التسلسل في دارة مع مولد وقاطعة ومعدلة كهربائية (الشكل 2)، ونضع أمام هذه الوشيعة وشيعة ثانية ب، نصل طرفيها بمقياس غلفاني، ونغلق دارة الوشيعة الأولى بواسطة القاطعة، فينحرف المقياس انحرافاً وقتياً مشيراً إلى تولد تيار متحرض فيها، وعندما نقطع تيار الوشيعة المحرضة الأولى تنحرف إبرة المقياس مشيرة إلى تولد تيار متحرض يعاكس التيار السابق في جهته، ونلاحظ أن التدفق في هذه المرة يتناقص، في حين أنه كان يتزايد في المرة السابقة.



الشكل (2)

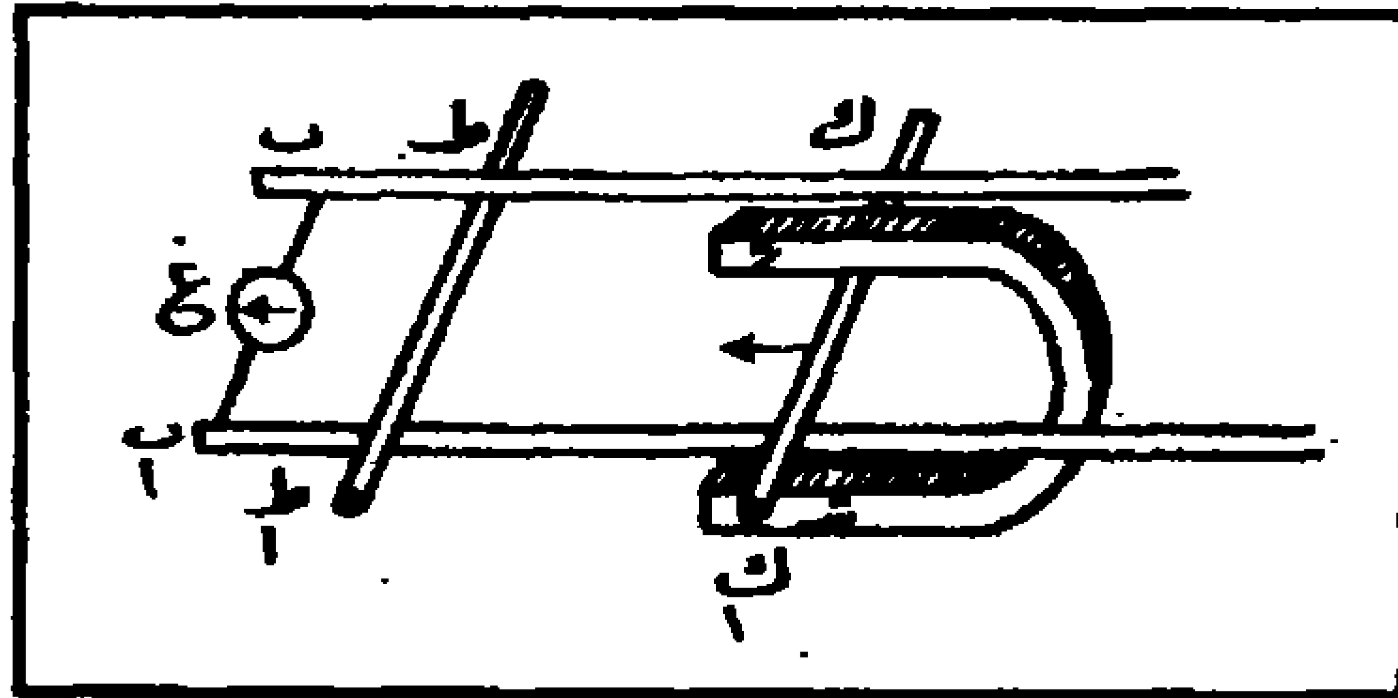
دار جرير للنشر والتوزيع

ويمكن أيضاً تغيير التدفق دون فتح الدارة المحرضة أو إغلاقها، بل بتغيير قيمة مقاومة المعدلة، مما يغير شدة التيار وبالتالي يغيّر شدة التيار وبالتالي يغيِّر التدفق من خلال الوشيعة المتحرضة.

ويمكن أيضاً تغيير التدفق من الوشيعة المتحرضة بإدخال نواة حديد فيها، أو إخراجها منها مما يجعل شدة التحريض المغناطيسي فيها ض بدلاً من ح.

ب. التحريض الكهرطيسي ناتج عن قطع خطوط التحريض المغنطيسي أثناء الحركة، تجربة السكتين:

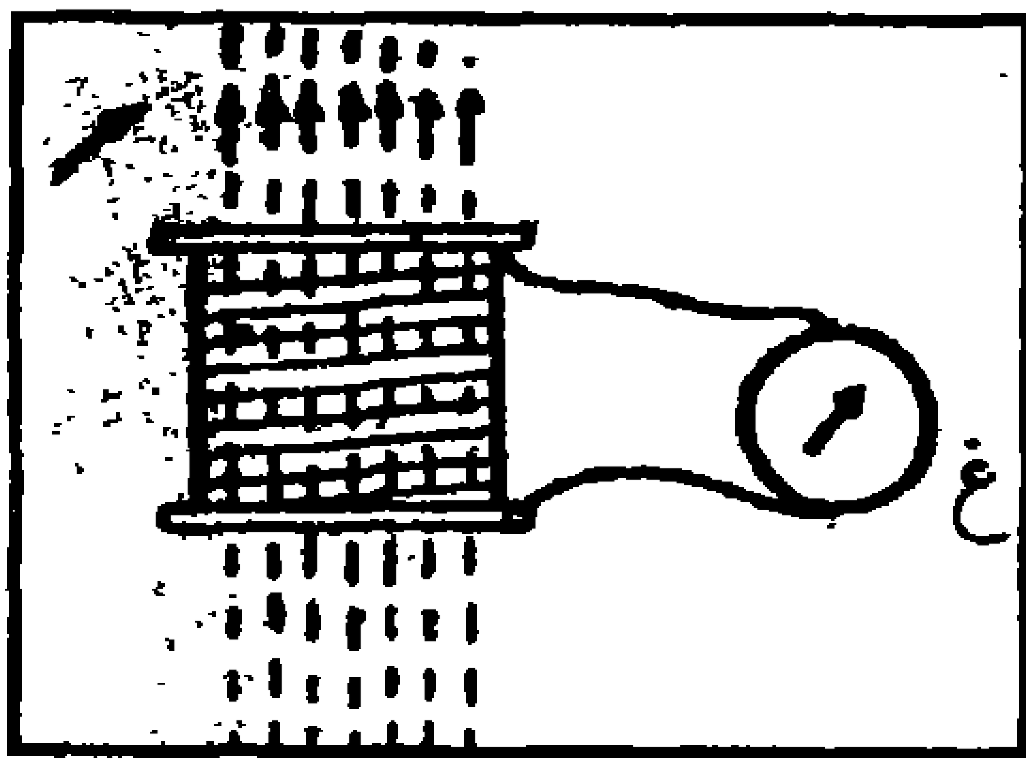
نأخذ سلكين نحاسيين متوازيين ب ك، ب1 ك1 ونصلهما إلى مقياس غلفاني، ونغلق دارتهما بسلك ك ك1 نضعه عليهما، ونضع مستوى السكتين بين شعبتي مغناطيس نضوي، ونزلق السلك ك ك1 على السكتين، فنلاحظ انحراف إبرة المقياس دالة على تهيج تيار متحرض. وإذا غيرنا جهة تحريك السلك ك ك1 تغيرت جهة التيار المتحرض الذي يدوم طول تحريك السلك ك ك1 ذلك لأن تحريك السلك يغير السطح (الشكل 3).



الشكل 3

جـ. التحريض الكهرطيسي ناتج عن تغير وضع السطح في المجال.

نضع وشيعة بحيث ينطبق محورها على منحى التحريض المغناطيسي الأرضي، ونصل طرفيها إلى مقياس غلفاني، وندور الوشيعة بسرعة حتى يتعامد محورها مع التحريض الأرضي، وينعدم التدفق من خلال حلقاتها فيكون التدفق قد تغير، فيتولد فيها تيار متحرض نلاحظه من انحراف إبرة المقياس. (الشكل 4).



الشكل 4

أما إذا نقلنا الوشيعة بحيث تبقى موازية لنفسها ولا يتغير فيها التدفق أو لا تقطع خطوط التحريض المغنطيسي فلا يتحرض فيها أي تيار.

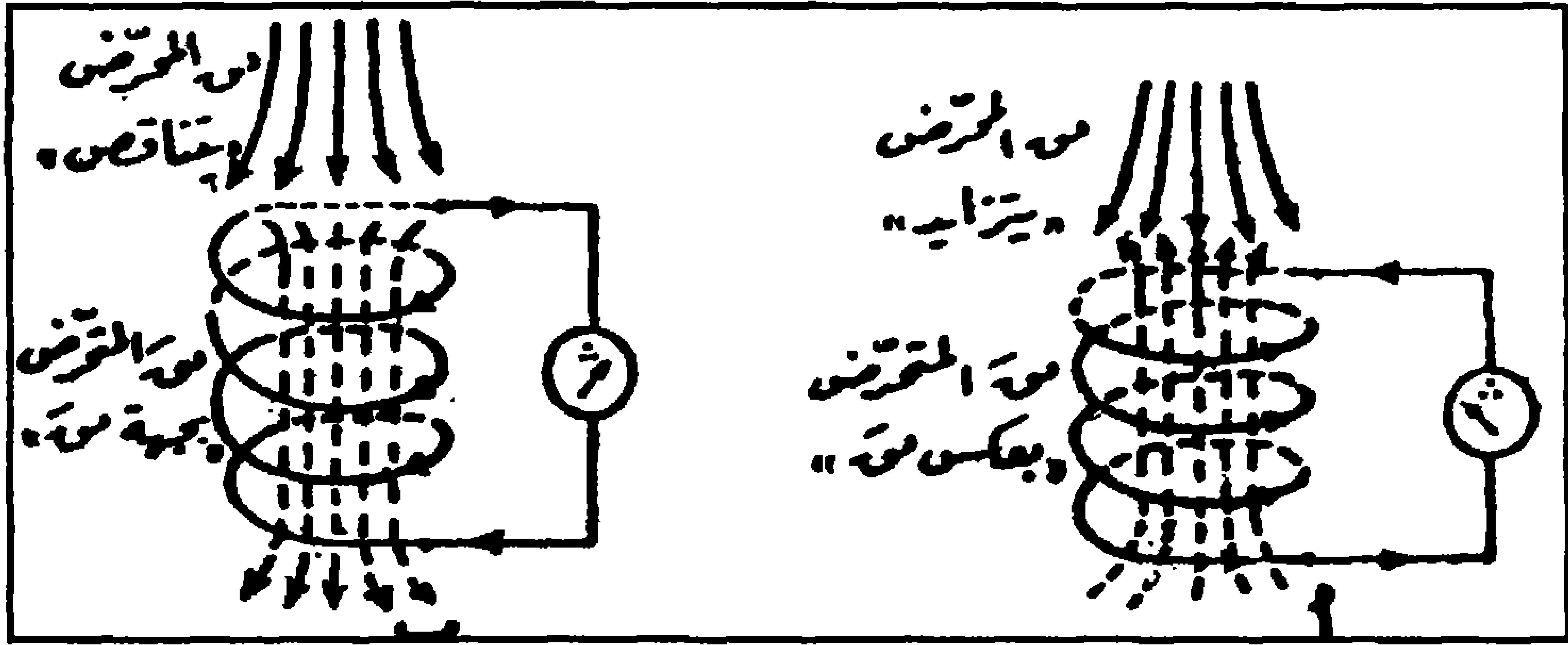
نستنتج من ذلك أنه في كل ناقل متحرك يقطع خطوط التحريض المغنطيسي تنشأ قوة حركة كهربائية تحريضية في الناقل المتحرك، كذلك كل تغير في تدفق التحريض المغنطيسي من خلال دارة مغلقة يؤدي إلى نشوء قوة محركة تحريضية فيها أثناء الحركة.

قانون لانس في تعيين جهة التيار المتحرض:

في تجربة فراداي الأساسية، عندما قربنا القطب الشمالي للمغناطيس، ازداد التدفق وتولد تيار متحرض في جهة، وعندما أبعدنا القطب الشمالي عن الوشيعة تناقص التدفق، وتولد تيار متحرض في جهة مخالفة مما يدل على أن زيادة التدفق تولد تياراً متحرضاً في جهة في حين أن تناقص التدفق يولد تياراً متحرضاً في الجهة المخالفة، ولتعيين جهة التيار المتحرض أجرى العالم لانس عدة تجارب أوجد بها قانونه الذي يجيب عن السؤال التالي 'كيف تكون جهة التيار المحرض' والذي ينص عليه:

إن جهة التيار المتحرض تكون بحيث يولد أفعالاً تعكس السبب الذي أدى إلى حدوثه.

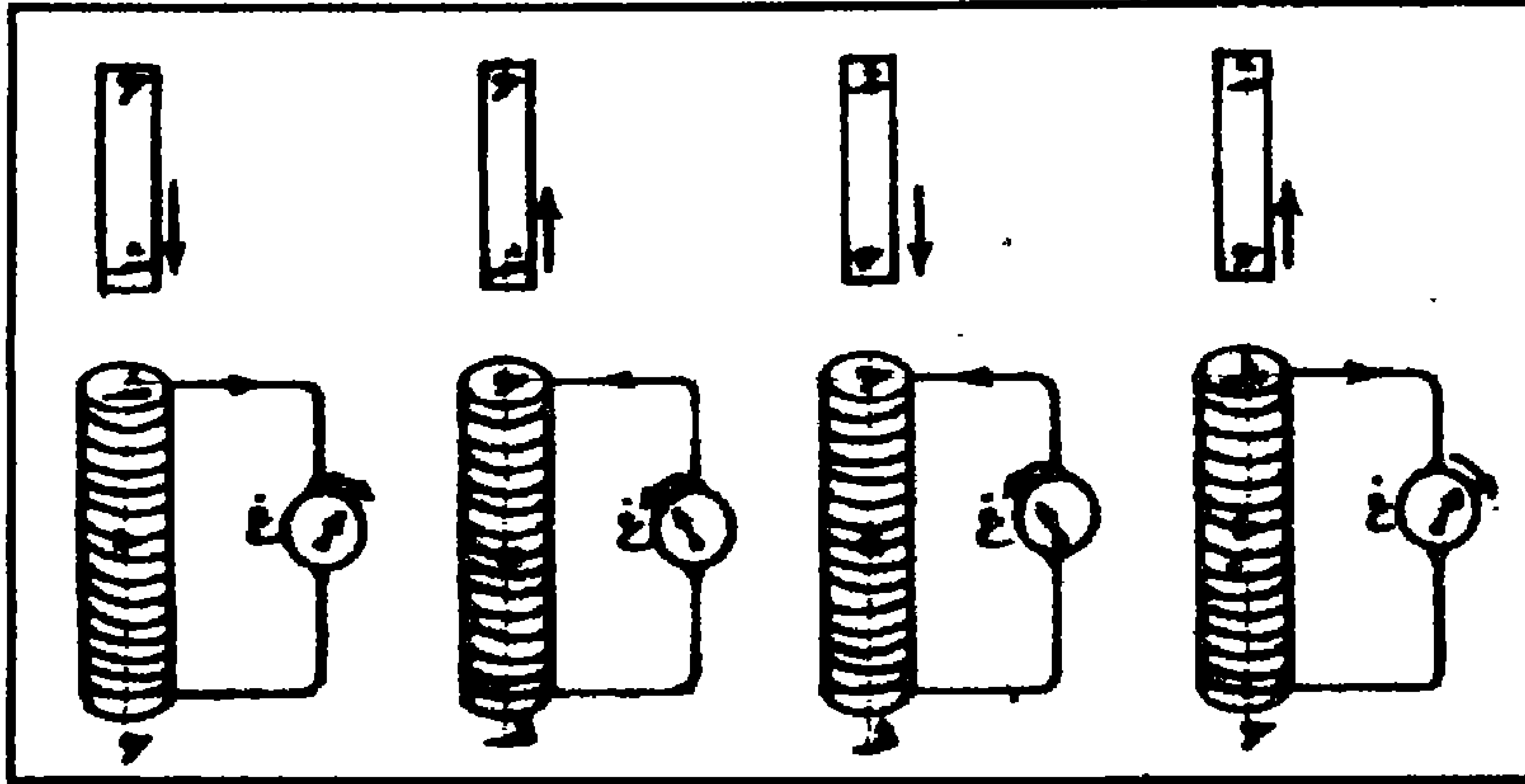
فإذا زاد التدفق الذي يبعثه المغناطيس إلى الوشيعة والذي يسمى التدفق المحرّض نق، تولد فيها تيار ينتج مجالاً متحرضاً، يكون تدفق يسمى التدفق المتحرض نق، جهته معاكسة لجهة التدفق المحرّض (الشكل 5 أ) وإذا نقص التدفق المحرض نق، يتولد التيار المتحرض، ويكون له تدفق متحرض نق، جهته موافقة لجهة التدفق المحرّض (الشكل 5 ب).



الشكل (5)

ويمكن أن نفهم قانون لانس أحياناً بشكل آخر، عندما نقرب قطباً شمالياً في أحد طرفي الوشيعة، يتولد فيها تيار بحيث يجعل من طرفها، المقابل للقطب الشمالي المقرب، قطباً شمالياً يسعى لكي يدفع عنه القطب الشمالي المقرب إليه، وعندما نبعد القطب الشمالي عن طرف الوشيعة، يتولد فيها تيار يجعل طرفها المقابل للقطب المبتعد قطباً جنوبياً يجذب إليه القطب المبتعد.

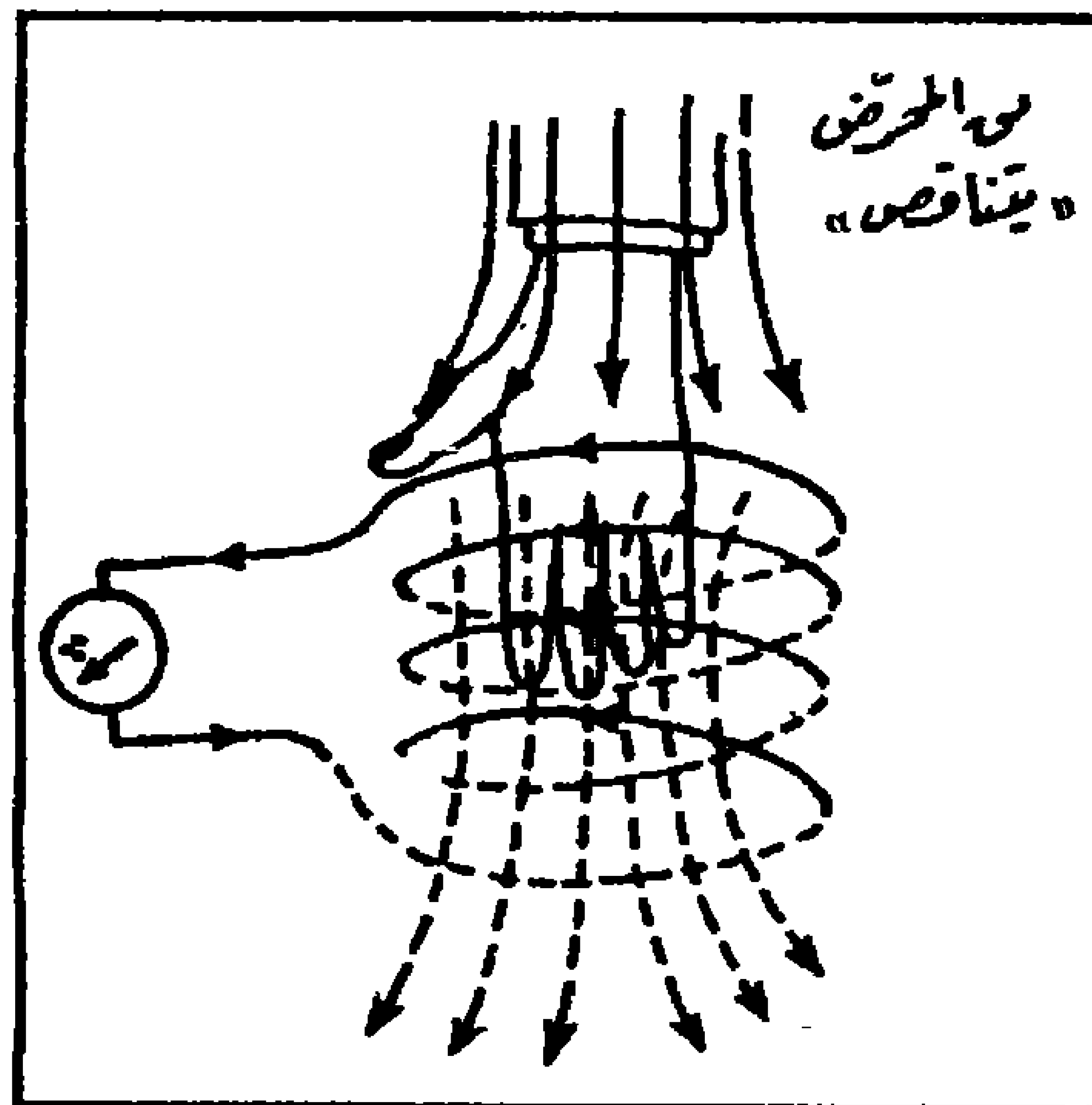
وهكذا الأمر لو قربنا قطباً جنوبياً لأصبح طرف الوشيعة المقابل جنوبياً يدفع عنه الجنوبي المقترب إليه. ولو أبعدنا عنها قطباً جنوبياً لأصبح طرفها المقابل قطباً شمالياً يجذب إليه الجنوبي المبتعد عنه (الشكل 6) فنستنتج أن ما يتحكم في جهة التيار المتحرض هو نوع القطب المغناطيسي المحرّض، ونوع الحركة لهذا القطب اقتراباً كانت أو ابتعاداً.



الشكل 6

قاعدة تعيين جهة التيار المتحرض:

نطبق قاعدة اليد اليمنى تطبيقاً عكسياً، فنبسط أصابع اليد اليمنى لتدخل في الدارة المتحرضة بجهة التدفق المتحرض نقَ (والذي يكون بجهة نق المحرض المتناقص، وبعكس جهة نق المحرض المتزايد) بحيث يمكن أن نقبض على إحدى الحلقات، ونترك الإبهام منفرداً، فيشير إلى جهة التيار المتحرض في سلك الدارة المتحرضة التي يمكن القبض عليها (7).



الشكل 7

الخلاصة:

يمكن تلخيص الدراسة الكيفية السابقة بأن حادثة التحريض الكهرطيسي تخضع للقانونين الكيفيين التاليين:

أ. قانون فراداي: كل تغير في التدفق الذي يخترق دارة مغلقة، يولد فيها تياراً محرّضاً، يدوم ما دام التغير.

قانون لانس: تكون جهة التيار المتحرّض بحيث يؤدي إلى أفعال تعاكس السبب الذي أدى إلى حدوثه.

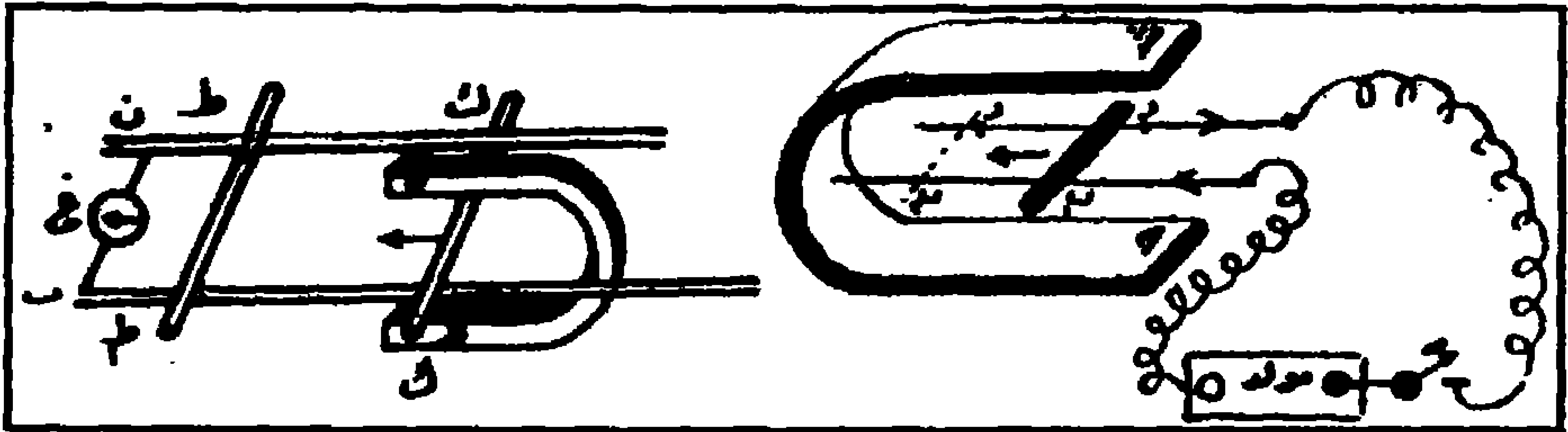
الدراسة الكمية:

موازنة بين الحادثة التحريضية والحادثة الكهرطيسية في تجربة السكتين:

نعيد تجربة السكتين ونمرُ فيها تياراً كهربائياً، جهته من ب1 إلى د1 فيتحرك السلك بتأثير القوة الكهرطيسية، وفي جهتها (الشكل 8 أ)، من ب1 د1 إلى ب2 د2.

نكرر هذه التجربة بعد حذف المولد واستبداله بمقياس غلفاني (الشكل (8 ب) ونحرك القضيب النحاسي من ط ط1 إلى ك ك1 فيزداد سطح الدارة الخاضعة للتحريض المغناطيسي، ويتولد فيها تيار متحرض تتعين جهته بقانون لانس، ويخضع بدوره لتأثير التحريض المغناطيسي فتنشأ قوة كهرطيسية جهتها معاكسة لجهة الحركة.

ويظهر من مقارنة هاتين الحادثتين أننا في الحادثة الكهرطيسية:



الشكل (8)

1. صرفنا قدرة كهربائية وأخذنا قدرة ميكانيكية.

2. سببت القوة الكهرطيسية حركة في جهتها وقامت بعمل موجب.

أما في الحادثة التحريضية فإننا:

1. صرفنا قدرة ميكانيكية وأخذنا قدرة كهربائية.
2. كانت جهة القوة الكهرطيسية بعكس جهة الحركة وقامت بعمل سالب.

وعليه فالحادثتان أحداهما عكس الأخرى، ويعتمد على الحادثة الكهرطيسية في صنع المحركات الكهربائية، وعلى الحادثة التحريضية في صنع المولدات الكهربائية.

القوة المحركة التحريضية وحسابها:

إن تحريك القضيب في تجربة السكتين التحريضية (الشكل 5 ب) هو سبب نشوء التيار فيها، ونعلم أن توليد تيار في دارة يمكن أن يتم باستعمال مولد له قوة محركة كهربائية، فتوليد تيار بالتحريض الكهرطيسي يكافئ استعمال مولد مناسب، تسمى قوته المحركة التحريضية والتي تعرّف كما يلي:

القوة المحركة التحريضية في دارة ما هي القوة المحركة الكهربائية لمولد مناسب ينتج التيار نفسه المتحرض في الدارة نفسها. ويرمز لها أيضاً بالرمز قم.

ولكي نحسب هذه القوة المحركة الكهربائية نعتمد على مبدأ مصونية القدرة بأشكالها.

إن العمل الذي صرفناه لتوليد التيار التحريضي يساوي ويعاكس العمل الذي تقوم به القوة الكهرطيسية التي تؤثر في هذا التيار المتحرض وتعاكس الحركة.

وقد رأينا أن عمل القوة الكهرطيسية يعطى بالدستور:

$$\text{عم} = \text{ش} (\text{نق}_2 - \text{نق}_1) = \text{ش}\ \Delta\ \text{نق}$$

فالقدرة الميكانيكية قد التي صرفناها هي إذاً:

$$\text{قد} = - \text{ش} \times \Delta\ \text{نق}$$

وهذه القدرة الميكانيكية قد تحولت بكاملها إلى قدرة كهربائية قدَ، كان يمكن أن نأخذها من المولد المكافئ؛ والتي تحسب بالدستور:

$$\text{قد} = \text{قم}\ \text{ش} \times \Delta\ \text{ز}$$

حيث Δ ز هو الزمن القصير الذي يحدث فيه تغير التدفق. وبالمساواة بين هاتين القدرتين ينتج:

$$\text{قم}\ \text{ش}\ \Delta\ \text{ز} = -\ \text{ش}\ \Delta\ \text{نق}$$

ومنه:

$$\text{قم} = -\frac{\Delta\ \text{نق}}{\Delta\ \text{ز}} \qquad \frac{\text{ويبر}}{\text{ثانية}}$$

ويدلنا هذا القانون على أن القوة المحركة الكهربائية التحريضية، تتوقف على تغير التدفق بالنسبة للزمن وأنه يمكن زيادتها في دارة مغلقة بزيادة سرعة تغير التدفق وذلك:

1. بزيادة العوامل التي تزيد من Δ نق.
2. بانقاص Δ ز.

ملاحظة:

تدل الإشارة السالبة في الدستور الأخير على أن قم مخالفة في الإشارة لمشتق التدفق بالنسبة للزمن أي قم موجبة عند تناقص التدفق وسالبة عند زيادته، وهذا يعني فيزيائياً أن التيار المتحرض يسري في جهة أولى إذا ازداد التدفق المحرض وفي الجهة المعاكسة إذا تناقص التدفق المحرض.

شدة التيار المتحرض وكمية الكهربائية المتحرضة:

لنفرض م مقاومة الدارة الكلية المغلقة فتكون شدة التيار المتحرض:

$$\text{ش} = \frac{\text{قم}}{\text{م}}$$

$$ش = -\frac{1}{م} . \frac{\Delta نق}{\Delta ز} \quad \frac{ويبر}{ثانية}$$

أما كمية الكهرباء المارة بسبب التحريض:

$$\Delta ك = ش. \Delta ز$$

أو

$$\Delta ك = -\frac{\Delta نق}{م} \quad \frac{ويبر}{أوم} \quad كولون$$

فليست لها أية علاقة بالزمن الذي يحدث خلاله تغير التدفق.

حالة دارة مفتوحة:

في التجارب السابقة إذا كانت الدارة مفتوحة فلا يستطيع التيار المتحرض المرور ولكن تتولد فيها دائماً قوة محركة تحريضية. وكما في المولد عندما تكون الدارة مفتوحة فإنه ينشأ فرق في الكمون بين طرفيها، يساوي القوة المحركة التحريضية.

تطبيق عددي: يتحرك قضيب معدني ب د طوله متر واحد في مستوى أفقي بسرعة 30 متراً في الثانية. احسب فرق الكمون بين طرفيه ب، د إذا علمت أن المركبة الأفقية للتحريض الأرضي تساوي 2×10^{-5} تسلا وأن زاوية الميل 60°.

خلال الزمن Δ ز = 1 ثانية، يمسح القضيب سطحاً: Δ سط = 1×30 م^2

ويكون التدفق الذي يجتاز هذا السطح Δ نق = Δ سط × قا

على اعتبار قا المركبة القائمة للتحريض الأرضي؛ ولكن:

قا = ف × ظل م = 2×10^{-5} × ظل 60 = $2 \times 10^{-5} \times \sqrt{3}$

قا = 346×10^{-7} تسلا

فينتج: Δ نق = $30 \times 346 \times 10^{-7}$ ويبر وتكون القوة المحركة التحريضية:

قم = - $\frac{\Delta \text{ نق}}{\Delta \text{ ز}}$ = $30 \times 346 \times 10^{-7}$

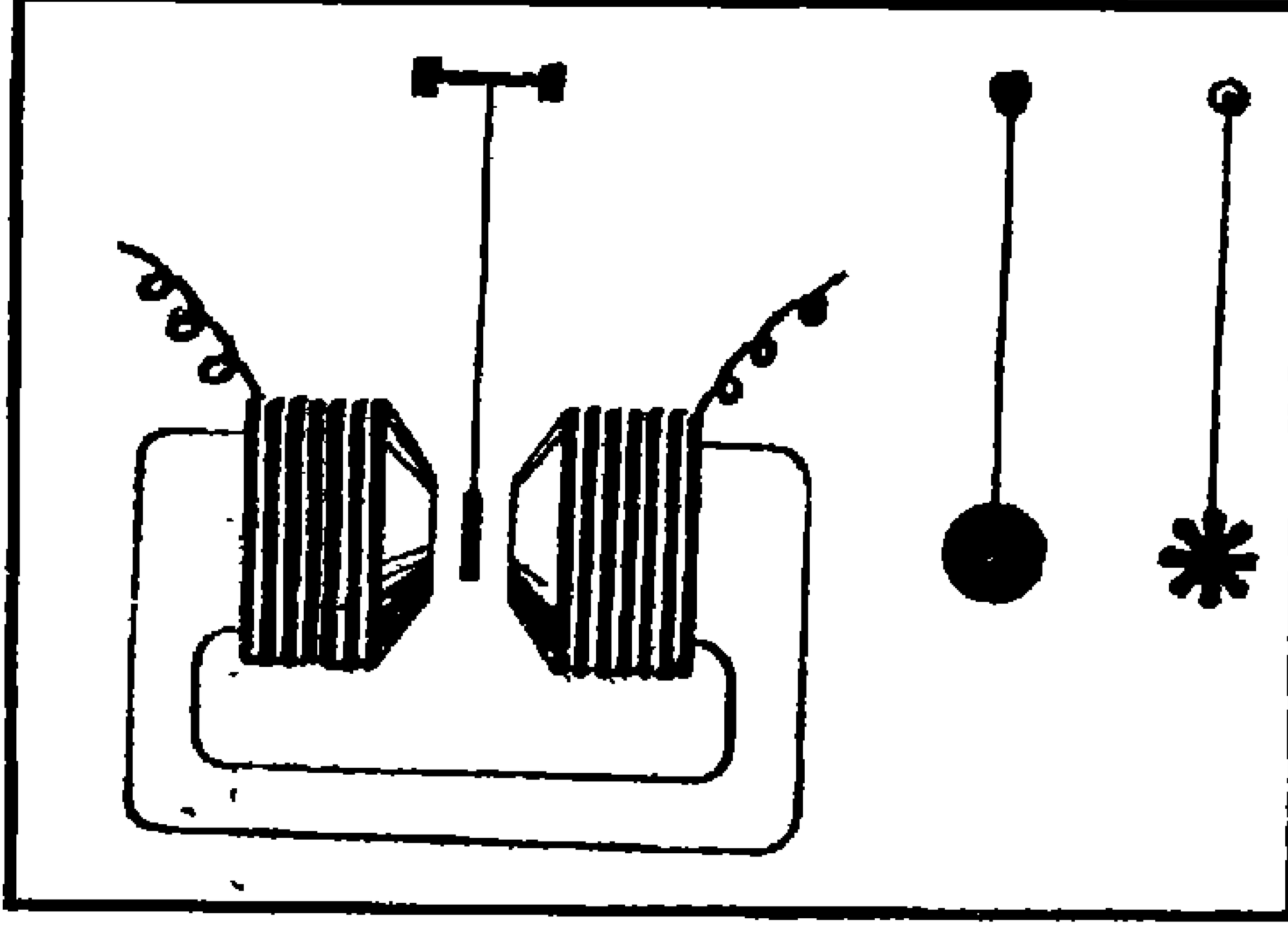
قم = - 1038×10^{-6} فولط = - 1.038 ميلي فولط

ويكون فرق الكمون بين ب، د: ف ب – ف د = 1.083 ميلي فولط.

تيارات فوكو:

هي تيارات تحريضية موضعية تنشأ في الكتل الناقلة عندما تتعرض هذه الكتل لمجالات مغناطيسية متغيرة الشدة.

تجربة: نغلق بين فرعي مغناطيس كهربائية نضوي قرصاً من النحاس (الشكل 9) فنلاحظ ما يلي:



الشكل (9)

أ. حالة عدم وجود تيار كهربائي في المغناطيس الكهربائي: نزيح القرص عن وضع اتزانه الشاقولي ونتركه وشأنه، فيقوم بعدة اهتزازات قبل أن يعود إلى وضع اتزانه.

ب. حالة مرور تيار في المغناطيس الكهربائي: نعيد العملية السابقة فنلاحظ أن القرص يعود إلى وضع اتزانه دون أن يهتز.

وإذا حاولنا تحريكه شعرنا بمقاومة، وبكمية من الحرارة تنتشر فيه تؤدي إلى رفع درجة حرارته.

التعليل: يتبع القرص النحاسي في الحالة أ قوانين حركة النواس.

أما في الحالة ب حيث يوجد مجال تحريضي مغناطيسي يخترق ناقلاً مغلقاً، فإن حركة هذا الناقل في المجال تؤدي إلى تغيير في تدفق التحريض المغناطيسي، مما يولد قوة محركة كهربائية تحريضية تعاكس حسب قانون لانس السبب الذي أدى إلى تغير التدفق، فتحاول قوى لابلاس الكهرطيسية، الناتجة عن فعل مجال التحريض

المغناطيسي في التيار المتحرض، إعادة التدفق إلى ما كان عليه فتعاكس هبوط القرص، وتؤثر عندئذ على القرص قوتان متعاكستان إحداهما ناتجة عن فعل الثقالة وتحاول إعادته لوضع التوازن، والثانية قوة لابلاس الآنفة الذكر. وعندما يصبح القرص في وضعه الشاقولي تكون سرعته صغيرة جداً، ولا تساعده قدرته الحركية الصغيرة على الارتفاع من جديد، ولذا فهو لا يهتز.

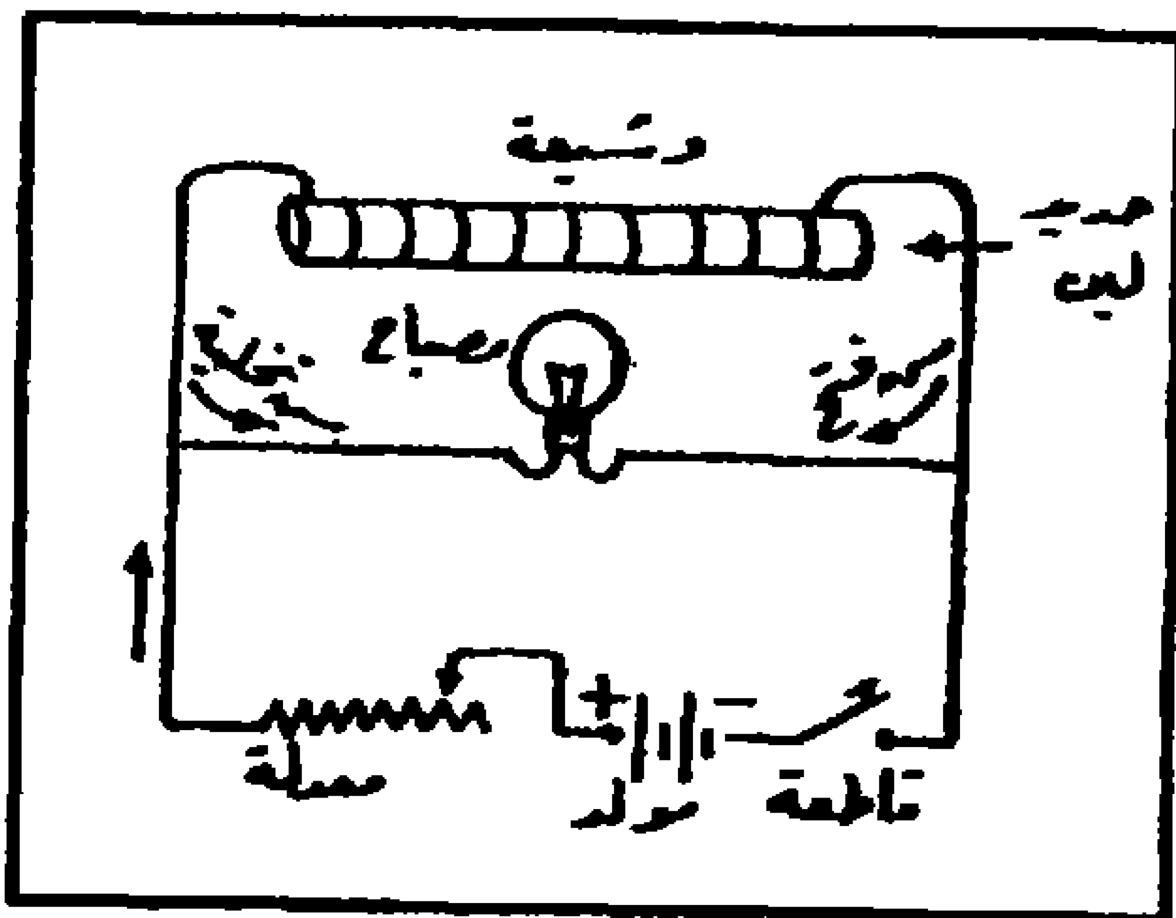
أما انتشار الحرارة في القرص فيعود لفعل جول الناتج عن التيارات التحريضية.

ملاحظة: لتيارات فوكو أثر ضار في الأجهزة الكهربائية، فهي تقلل من مردودها بسبب القدرة الكهربائية الضائعة بفعل جول. لذلك نستبدل المواد المعدنية المصمتة المستخدمة في أمثال هذه الأجهزة بكتل معدنية معزول بعضها عن بعض تنقطع فيها دارات التيار التحريضية ويخفف تأثيرها.

فإذا استبدلنا في التجربة السابقة بالقرص المصمت قرصاً مقطعاً وجدنا أن القرص الجديد يقوم لدى هبوطه بعدة اهتزازات قبل أن يعود إلى وضع اتزانه.

التحريض الذاتي:

نؤلف دارة تتألف من وشيعة تحوي قضيباً حديدياً وقاطعة قا ومولداً مو ومعدلة ثم نصل مصباحاً كهربائياً على التفرع بين مربطي الوشيعة، كما هو مبين في (الشكل 10).



الشكل (10)

أ. نغلق الدارة فنلاحظ أن المصباح يتوهج بعد قطع الدارة بشدة ثم يعود إلى ضيائه المعتاد.

ب. نترك التيار يجري فترة من الزمن ثم نقطع الدارة فنلاحظ أن المصباح يتوهج بعد قطع الدارة بشدة. تفوق وتوهجه الأول ثم لا يلبث أن ينطفئ.

وتعليل ذلك أنه عندما أغلقنا الدارة ازدادت شدة التيار المار في الوشيعة من الصفر إلى ش فيزداد التدفق في داخلها، وتحدث من جراء ذلك قوة محركة تحريضية تدعى بالقوة المحركة التحريضية الذاتية لنشوئها في دارة المحرض ذاته، وتولد هذه تياراً تحريضياً يعاكس تيار المولد، إلا أنه ينضاف إليه في فرع المصباح، ويتوهج المصباح.

أما عند فتح الدارة فإن تيار الوشيعة ينقص من ش إلى الصفر وينقص التدفق المحرض، وتنشأ بنقصانه قوة محركة تحريضية تولد تياراً متحرضاً يسير في اتجاه التيار الأصلي، فيزيد من أمد هذا التيار ويتفرع في دارة المصباح الذي يتوهج بشدة.

ملاحظة: دلت التجارب على أنه إذا كانت النواة الحديدية التي ضمن الوشيعة مفتوحة كان الزمن اللازم لزيادة شدة التيار من الصفر إلى ش أكبر من الزمن اللازم لنقصانه من ش إلى الصفر أي أن الزمن اللازم لإغلاق الدارة أكبر من الزمن اللازم لفتحها، وبذلك تكون القوة المحركة التحريضية الذاتية عند فتح الدارة، أكبر بكثير من القوة المحركة التحريضية الذاتية عند إغلاقها.

عامل التحريض الذاتي:

إذا مر تيار شدته ش في دارة ولد مجالاً محرضاً ح تتناسب شدته طرداً مع شدة التيار ش، وتدفق هذا المجال نق يتناسب طرداً مع شدته ح، أي يتناسب التدفق طرداً مع شدة التيار نق فيمكننا أن نكتب:

$$\text{نق} = \text{ثا} \times \text{ش}$$

إلا أن القوة المحركة التحريضية الذاتية هي ككل قوة محركة تحريضية دستورها هو

ومنه:

$$\text{قم د} = -\frac{\Delta\ \text{ش}}{\Delta\ \text{ز}}$$

$$= -\text{ثا}\ \frac{\Delta\ \text{ش}}{\Delta\ \text{ز}}$$

ويدعى العامل (ثا) بعامل التحريض الذاتي ويرمز إليه بـ (ذ).

فتصبح العلاقة:

$$\text{قم ذ} = -\text{ذ}\,\frac{\Delta\ \text{ش}}{\Delta\ \text{ز}}$$

وتدل الإشارة (–) أنه إذا ازدادت الشدة ش فإن Δ ش >. وتصبح قم1 <. وهذا يعني أن جهة التيار المتحرض تعاكس جهة الشدة ش.

وإذا تناقصت الشدة ش فإن Δ ش <. أي قم ذ >. فيكون التيار المتحرض وللشدة ش نفس الجهة.

وفي القانون السابق إذا قدرت قم ذ بالفولط و Δ ش بالأمبير و Δ ز بالثانية قدر ذ بالهنري.

تعريف الهنري:

الهنري هو عامل التحريض الذاتي لدارة مغلقة تظهر فيها قوة محركة تحريضية ذاتية قيمته فولط واحد عندما تتغير شدة التيار الأصلي المار فيها بصورة منتظمة وبمعدل أمبير واحد في كل ثانية.

تمارين ومسائل

1. تتألف وشيعة من 1000 حلقة سطح كلّ منها 50 سم2، نقرب منها مغناطيسياً يولد تحريضاً مقداره 5×10^{-5} تسلا خلال $\frac{1}{10}$ ثانية. احسب القوة المحركة التحريضية في الوشيعة.

الجواب: قم = 25×10^{-4} فولط

2. وضع إطار مستطيل في مجال تحريض منتظم شدته 2×10^{-2} تسلا ويتألف هذا الإطار من 200 لفة سطح كل منها 8 سم2 فإذا كان مستوي الإطار في اللحظة الابتدائية موازياً لخطوط القوة وإذا جعلناه عمودياً على هذه الخطوط خلال 0.1 ثانية احسب القوة المحركة التحريضية في الإطار.

الجواب: 32 ميلي فولط

3. تتألف طارة من 100 لفة ومن سلك طوله 300 م ومقاومته 3 أوم في الكيلو متر الواحد. تجعل الطارة عمودية على منحى التحريض الأرضي وتوصل نهايتا السلك بطرفي مقياس غلفاني مقاومته 15.1 أوم. ما كمية الكهرباء المتحرضة حين تدور الطارة 90° أي حين تصبح في مستوى الزوال المغناطيسي. يفرض التحريض الأرضي 5×10^{-5} تسلا.

الجواب: 225 ميكرو كولون

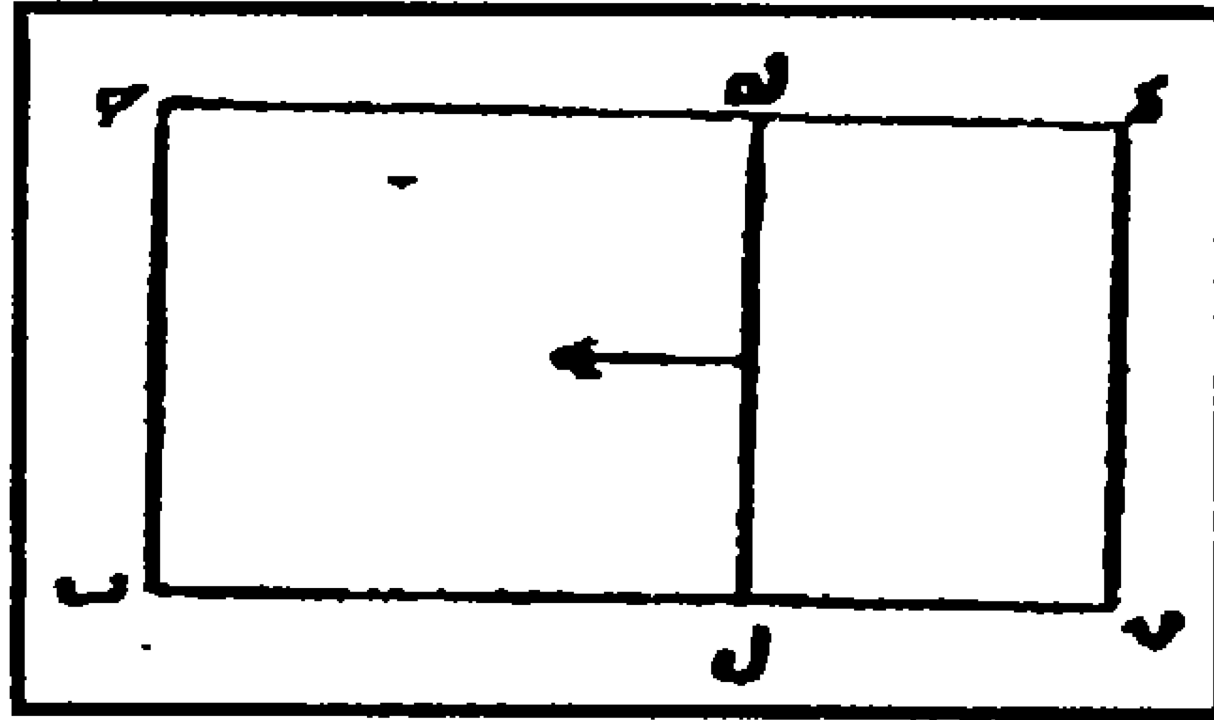
4. مدى جناحي طائرة معدنية 12م وتطير بسرعة 720كم/ ساعة فإذا فرضت المركبة القائمة للتحريض الأرضي 0.55×10^{-4} تسلا، احسب فرق الكمون المتحرض بين طرفي الجناحين.

الجواب: 0.132 فولط

5. يستند ناقل ب حـ طوله 1.5م على ناقلين متوازيين س سَ، ع عَ بنهايتيه ب، حـ ويصنع ب حـ مع س سَ زاوية قدرها 30° فإذا كانت هذه النواقل موضوعة في مجال تحريض عمودي على المستوى س سَ ع عَ شدته 4×10^{-5} تسلا، فما القوة الكهرطيسية التي تؤثر في الناقل ب حـ حين يجتازه تيار شدته 8 أمبير. يقطع هذا التيار ويحرك ب حـ بسرعة 660 متراً في الدقيقة على أن ترسم نهايتاه ب، ح الناقلين المتوازيين، فما هي القوة المحركة الكهربائية التحريضية في هذا الناقل.

الأجوبة: 48×10^{-5} نيوتن، 0.33 ميلي فولط

6. وضع إطار مستطيل ب حـ د ق عمودياً على مجال تحريض منتظم ح = 1 تسلا ويستند على الإطار سلك ك ل (الشكل (11)) ينتقل من د إلى حـ بسرعة ثابتة 1 سم / ثا. احسب القوة المحركة التحريضية التي تظهر في ك ل.



الشكل (11)

وما جهة التيارات المتحرضة التي تمر في كل من الإطارين ب حـ ك ل، ك د ق ل إذا كان التحريض ح يتجه بحيث يدخل من وجهها الأمامي ويخرج من وجهها الخلفي.

وإذا فرضت مقاومة الأسلاك الناقلة 2×10^{-4} أوم لكل سم من طولها.

احسب شدة التيارات في الفروع ب حـ، د ق، ك ل عندما يقع ك ل في ثلث المسافة د حـ اعتباراً من د.

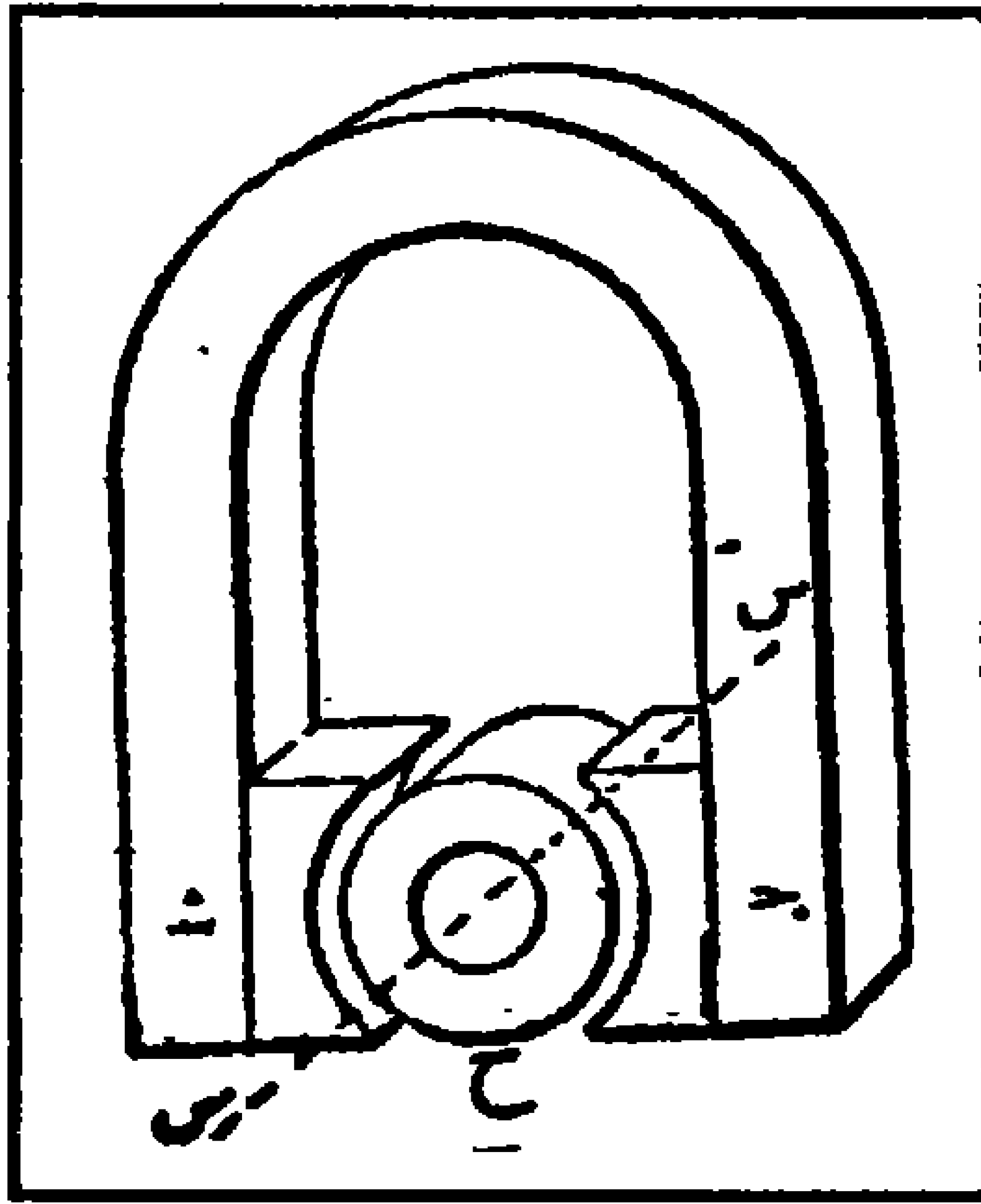
يفرض: ب حـ = 2 سم، حـ د = 6 سم

الأجوبة: قم = 2 × 10^{-4} فولط، جهة عقارب الساعة في ب حـ ك ل، عكس هذه الجهة في ك د ق ل، الشدة في ك ل: 0.184 أمبير. في ب حـ: 0.065 أمبير. في د ق: 0.109 أمبير.

آلة غرام المولدة والآخذة

المبدأ:

تتألف آلة غرام من دارة مغلقة حرة الدوران ضمن مجال تحريض مغناطيسي ثابت الشدة، وهي على نوعين مولدة وآخذة. ومبدأ مولدة آلة غرام كمبدأ دولاب بارلو المولد، فهي تعتمد على حادثة التحريض الكهرطيسي وتحول القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية. وأما آخذة آلة غرام فتعتمد كدولاب بارلو المحرك على فعل مغناطيس في تيار كهربائي، وهي تحول القدرة الكهربائية إلى قدرة ميكانيكية.



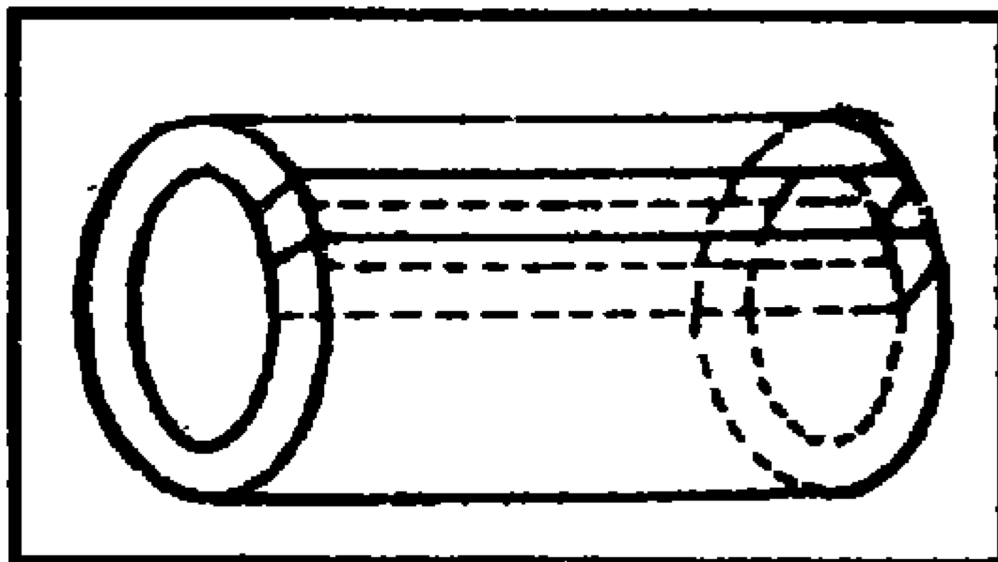
الشكل (12)

آلة غرام المولدة وأقسامها:

تتألف آلة غرام المولدة من الأقسام التالية:

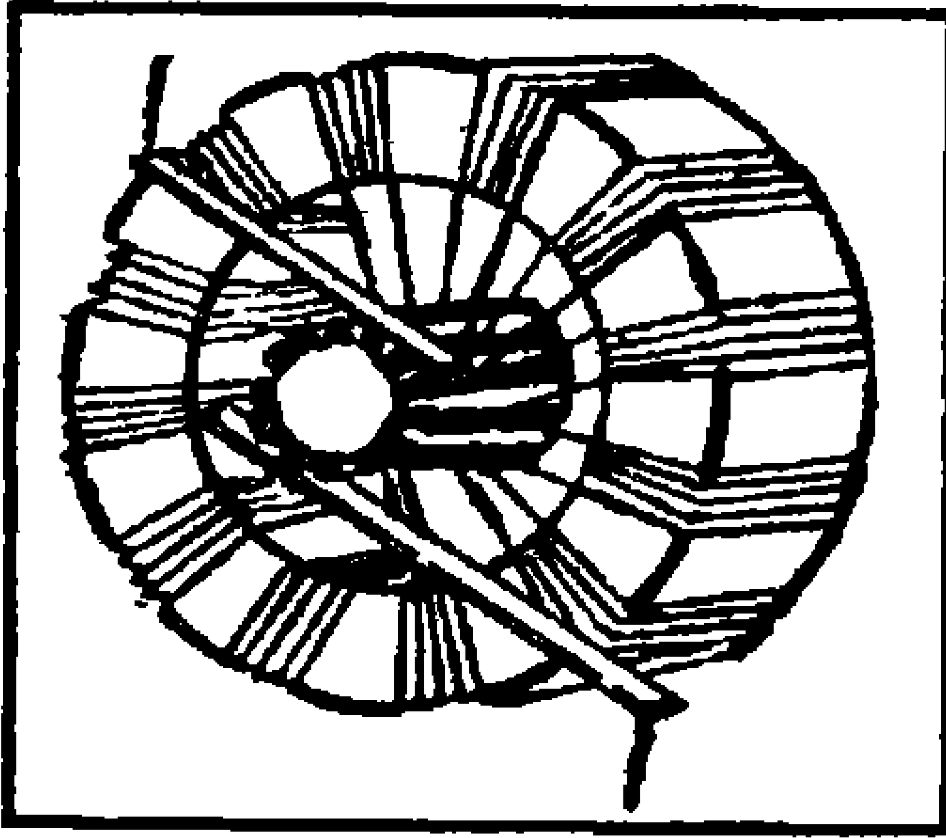
1. **المحرّض:** وهو القسم الثابت من المولدة ويتألف من مغناطيس يكون كهربائياً في غالب الأحيان ويحوي هذا المغناطيس بين قطبيه على تجويف أسطواني كما في الشكل (12).

2. **المتحرض:** وهو القسم المتحرك من آلة غرام ويقوم مقام الدولاب النحاسي في تجربة دولاب بارلو، وهو يتألف من أسطوانة مفرغة من الحديد المطاوع ينطبق محورها على محور التجويف، وتشغل كامل التجويف الذي بين قطبي المغناطيس، ولف على جدارها سلك نحاسي معزول عدة لفات بشكل مستطيل، (الشكل 13).



(الشكل13)

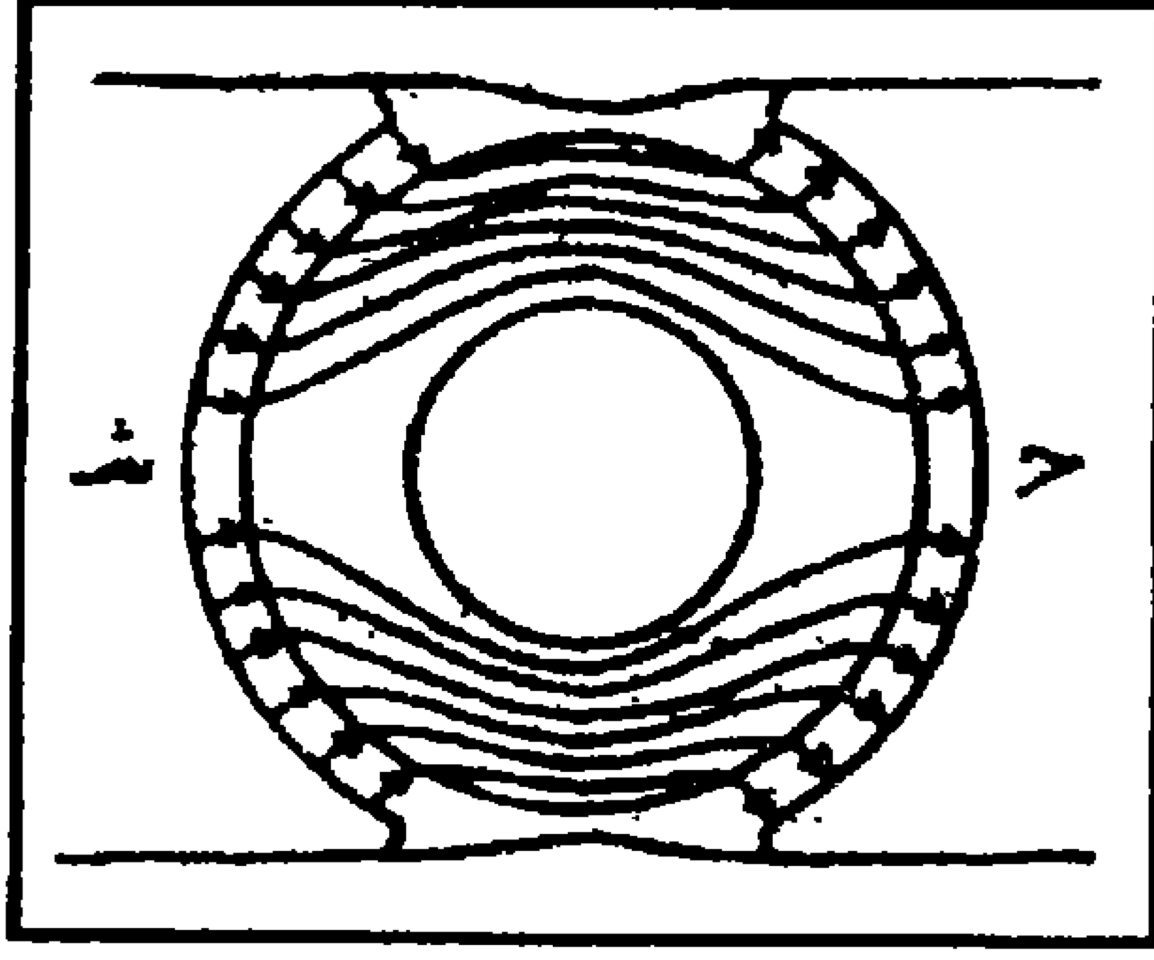
3. **الجمّع والمسفرتان:** يقسم عادة السلك النحاسي الملفوف على الأسطوانة إلى عدة وشائع وجهة اللف في جميعها واحدة، تتصل نهاية سلك كل وشيعة مع بداية سلك الوشيعة التالية، وتلحم النهايتان معاً في إحدى الصفائح النحاسية المعزولة والمركبة على محور الأسطوانة، وعدد هذه الصفائح يساوي عدد الوشائع، وتسمى هذه الصفائح الجمع. وهي تدور مع المتحرض بدوران المحور الذي تستند عليه، وهكذا تؤلف الوشائع والحالة هذه دارة مغلقة لاتصال نهايات أسلاكها بعضها ببعض على التسلسل عن طريق الجمع. وتستند قطعتان نحاسيتان ثابتتان (لا تدوران بدوران المتحرض)، بضغط خفيف بواسطة نابضين مناسبين على الجمع وذلك في نقطتين واقعتين على القطر الشاقولي إحداهما في الجهة العلوية من الجمع والأخرى في جهته السفلية، وتسمى هاتان القطعتان النحاسيتان: بالمسفرتين وهما تمثلان قطبي المولدة (الشكل 14 أ) وتخرج خطوط القوى المغناطيسية للمغناطيس المحرض من قطبه الشمالي وتقطع الأسطوانة



الشكل (14)

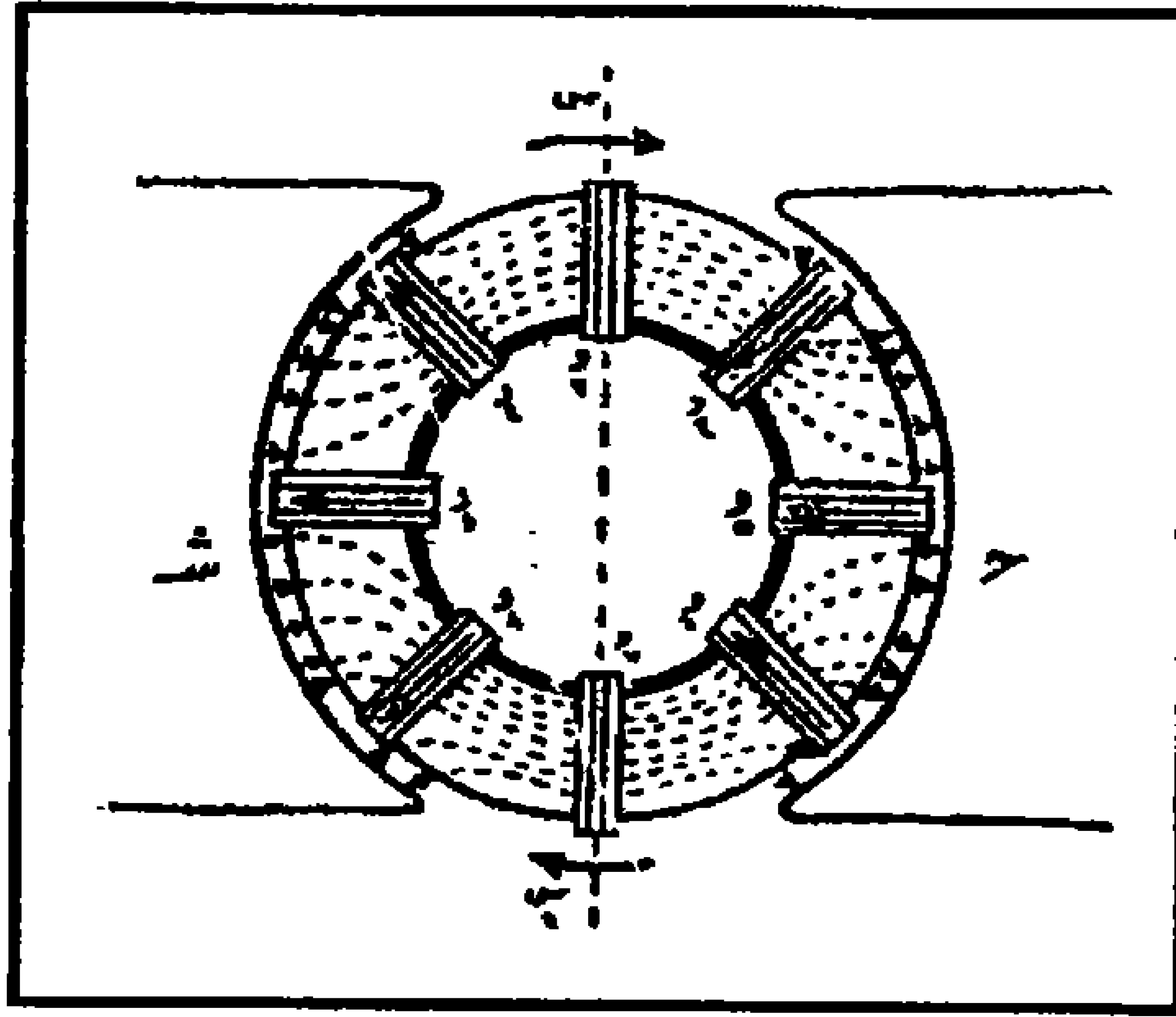
الحديدية متعامدة مع محورها ومتجهة إلى قطب المغناطيس الجنوبي (الشكل 14 ب) وطبيعي أن تتراص خطوط القوة المغناطيسية في مادة الأسطوانة، لأن مادتها أكثر نفاذاً لخطوط القوة من الجوف الهوائي الذي في داخل الأسطوانة.

القوة المحركة التحريضية:



الشكل (14ب)

عندما يدور المتحرض ينشأ في سلك الوشائع تيار تحريضي تتعين جهته. بقانون لنز كما تنشأ قوة محركة تحريضية يمكن حسابها.

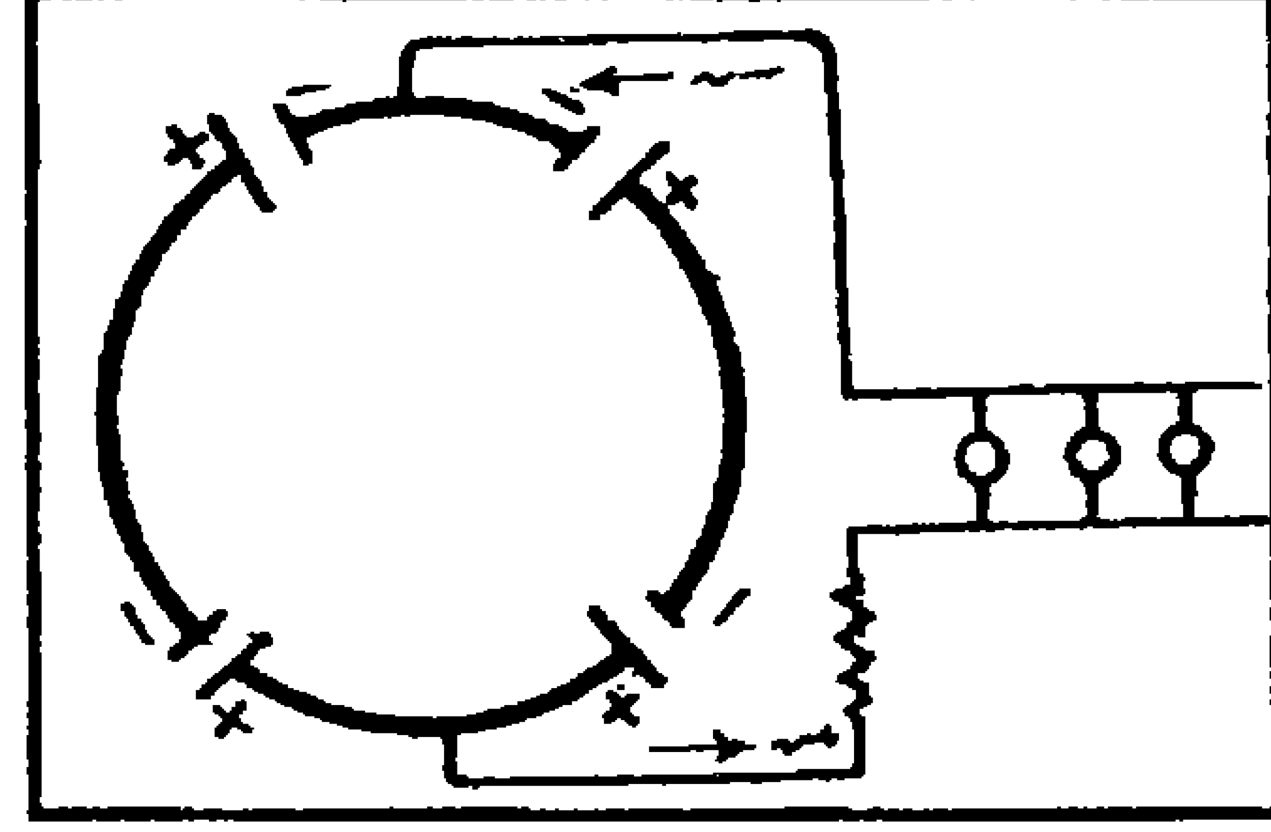


الشكل (15)

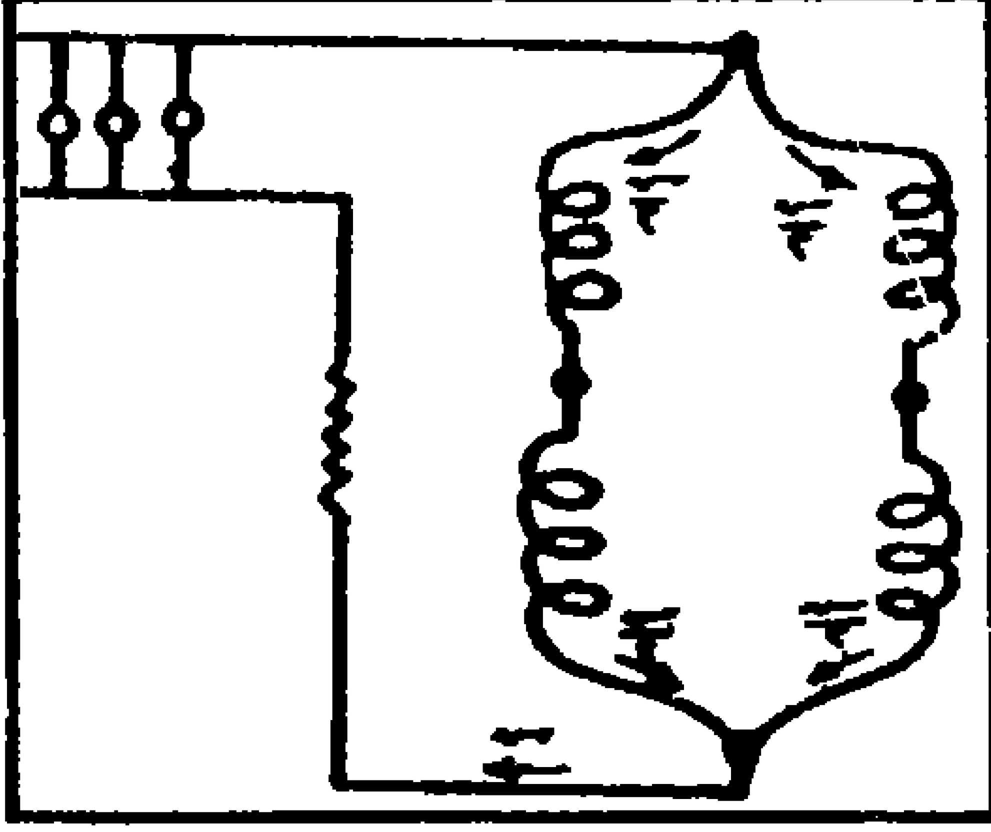
فأثناء الدوران يتغير التدفق في الوشيعة و1 وتنشأ فيها قوة متحركة تحريضية عند انتقالها في الأوضاع و1، و2 .. و8 (الشكل 15) تكافئ مجموعتا الوشائع على يمين ويسار س س1 مجموعتين متماثلتين من المولدات المتسلسلة ربطتا على التفرع (الشكلان 16 و 17).

حساب القوة المحركة:

التحريضية:

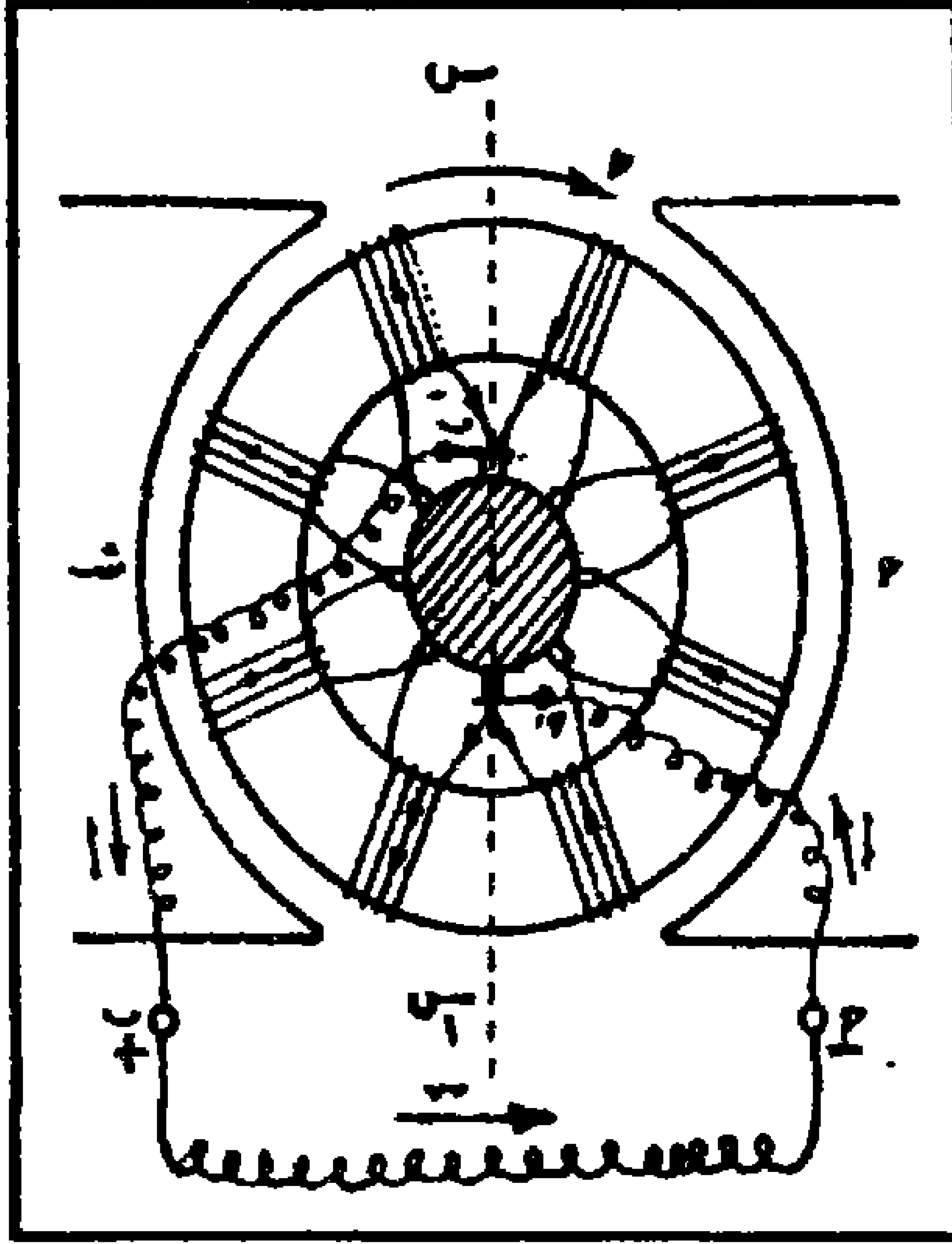


الشكل (16)



الشكل (17)

وجدنا في البند السابق أن القوة المحركة لآلة غرام هي القوة المحركة الكهربائية المتولدة من إحدى المجموعتين فقط لسلسلة الوشائع، أي من نصف وشائع المتحرض لكون ربطهما على التوازي الشكل 18، فإذا فرضنا قم1 القوة المحركة المتولدة من كل لفة و ع عدد اللفات الكلية كانت القوة المحركة الكهربائية للآلة هي:



الشكل 18

$$قم = \frac{ع}{2} قم_1$$ ولكن:

$$قم = \frac{\Delta\ نق}{\Delta\ ز}$$

حيث Δ نق هو تغير التدفق المحرض في لفة واحدة خلال الزمن Δ ز الذي هو مدة هذا التغير. وبما أن التدفق الكلي نق بين قطبي المغناطيس ينقسم إلى قسمين متساويين في جزئي المتحرض العلوي والسفلي، فتغير التدفق خلال نصف دورة من دورات

المتحرض ينحصر بين + $\frac{نق}{2}$ و $\frac{نق}{2}$ لأن التدفق في الوضع الثاني يتم من وجه اللفـة الثاني. إذاً:

$$\Delta \text{ نق} = (-\frac{نق}{2}) - (+\frac{نق}{2}) = -\text{ نق}$$

فإذا كان عدد دورات المتحرض ن دورة / ثـا أي 2 ن نصـف دورة / ثـا كانـت مدة كل نصف دورة هي Δ ز = $\frac{1}{2ن}$ ثا وتصبح علاقة القوة المحركة المتولدة في كل لفة هي:

قم 1 = − $\frac{-نق}{\frac{1}{2ن}}$ = 2 ن نق وتكون القوة المحركة المتولدة

في آلة غرام قم = $\frac{ع}{2}$قم1 = $\frac{ع}{2}$ × 2 ن نق أو:

قم = ع. ن. نق

ونلاحظ أن القوة المحركة المتحرضة قم لآلة غرام تتناسب:

1. طرداً مع (ع) عدد لفات المتحرض.
2. طرداً مع (ن) عدد دورات المتحرض في الثانية.
3. طرداً مع (نق) التدفق بين قطبي المغناطيس، وبما أن التدفق الكلي نـق = 2 سـط. ض فيتعلـق التـدفق (نـق): بالسـطح سـط لمقطـع الوشيعة، وبشـدة التحـريض المغناطيسي ض في مادة الأسطوانة.

حساب شدة التيار:

إذا كانت مـ1 مقاومة السلك النحاسي لجميع الوشائع المؤلفة للمتحرّض، كانت مقاومة نصف الوشائع الواقعة على اليمين أو يسار س $س_1$ هو $\frac{م_1}{2}$ ولما كانت الوشائع مربوطة وفق فرعين، فالمقاومة الكلية لهما تساوي المقاومة المعادلة للفرعين، ولما كانت مقاومة الفرعين واحدة، ينتج أن المقاومة المعادلة للفرعين تساوي نصف مقاومة أحد الفرعين مـ = $\frac{1}{2} \times \frac{م_2}{2} = \frac{م_1}{4}$.

وهذه هي المقاومة الداخلية لآلة غرام، فإذا فرضنا م المقاومة الخارجية للدارة الموضوعة فيها مولدة غرام، أمكن تطبيق قانون أوم على دارة مغلقة:

$$قم = (مـ + م)\ ش = \frac{قم}{\frac{مـ_1}{4} + م} =$$

الاستطاعة:

تعطي الاستطاعة المتولدة مقدرة بالواط بالعلاقة:

عه = قم. ش

واط فولط أمبير

ولزيادة هذه الاستطاعة نزيد قيمة كل من العاملين قم، ش. وتزداد قم بزيادة سرعة الدوران وإنما إلى حد معين حذراً من القوة النابذة المطبقة على المتحرض، ويفضل في هذه الحالة استخدام مولدة غرام المتعددة الأقطاب؛ حيث نستخدم عدة أقطاب في المحرض ودارة واحدة في المتحرض، فتكون كتلة المتحرض قليلة ولا تزداد القوة النابذة ازدياداً كبيراً. كذلك تزداد القوة المحركة بزيادة الحد تق، ويتم ذلك باستعمال مجال تحريض شديد إلى حد ما ومادة عامل إنفاذها كبير للغاية.

مردود آلة غرام:

يدور المتحرض في مولدة غرام بواسطة عنفة أو محرك استطاعته عـه1 ويتولـد في المتحرض نتيجة هذا الدوران قوة محركة كهربائية استطاعتها عه = قم. ش ويكون دوماً عه < عه1 بسبب ضياع القدرة بالأشكال الآتية:

1. ضياع قسم من القدرة المصروفة في التحاك الميكانيكي.
2. تحصل في مادة المتحرض تيارات فوكو فتنتشر فيه كمية من الحرارة.
3. يتحول قسم من القدرة الكهربائية إلى حرارة بفعل جول في الأسلاك النحاسي.

فإذا كانت الاستطاعة الجاهزة بين مربطي مولدة غرام هـي عـه2 = ف. ش كـان المردود النظري هو نسبة الاستطاعة الجاهزة إلى الاستطاعة التي تولدها أي:

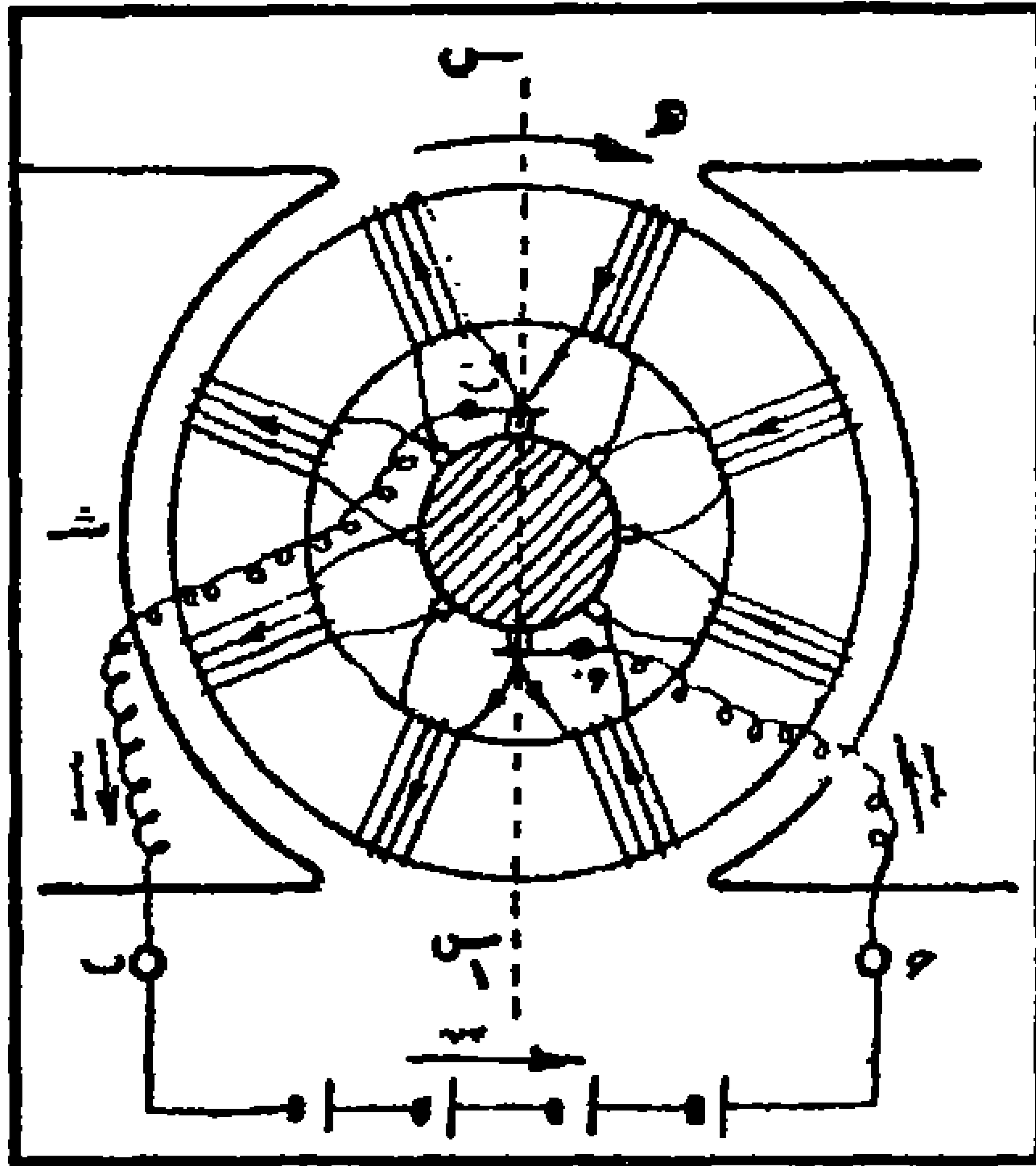
$$\text{مر} = \frac{\text{عه}2}{\text{عه}} = \frac{\text{ف.ش}}{\text{قم.ش}} = \frac{\text{ف}}{\text{قم}}$$

ونسمي المردود الصناعي نسبة الاستطاعة الجاهزة إلى الاستطاعة الميكانيكية

$$\text{مر} = \frac{\text{عه}2}{\text{عع}1} = \frac{\text{ف.ش}}{\text{عع}1}$$

آخذة غرام:

رأينا في التحريض الكهربائي أن الجهاز نفسه (كدولاب بارلو) يمكن أن يستعمل كمولد كهربائي أو كمحرك كهربائي إذ أن ذلك هو نتيجة للعلاقة الوثيقة بين الحادثة الكهرطيسية من جهة والحادثة التحريضية من جهة ثانية.



الشكل (19)

فإذا أرسلنا في متحرض آلة غرام تياراً متواصلاً آخذ المتحرض بالدوران، وتصبح الآلة محركاً كهربائياً وتدعى آخذة غرام (الشكل 19).

طرق التهيج في آلة غرام الأخذة:

يفضل أن يكون المحرض في آلة غرام مغناطيسياً كهربائياً، وأما التيار الـذي يغـذي ملف هذا المغناطيس، فيمكن أن يكون من المولد الذي يغذي المتحـرض أو مـن مولـد مستقل.

الفصل الحادي عشر

تطبيق على
علاقات ماكسويل

الفصل الحادي عشر

تطبيق على علاقات ماكسويل

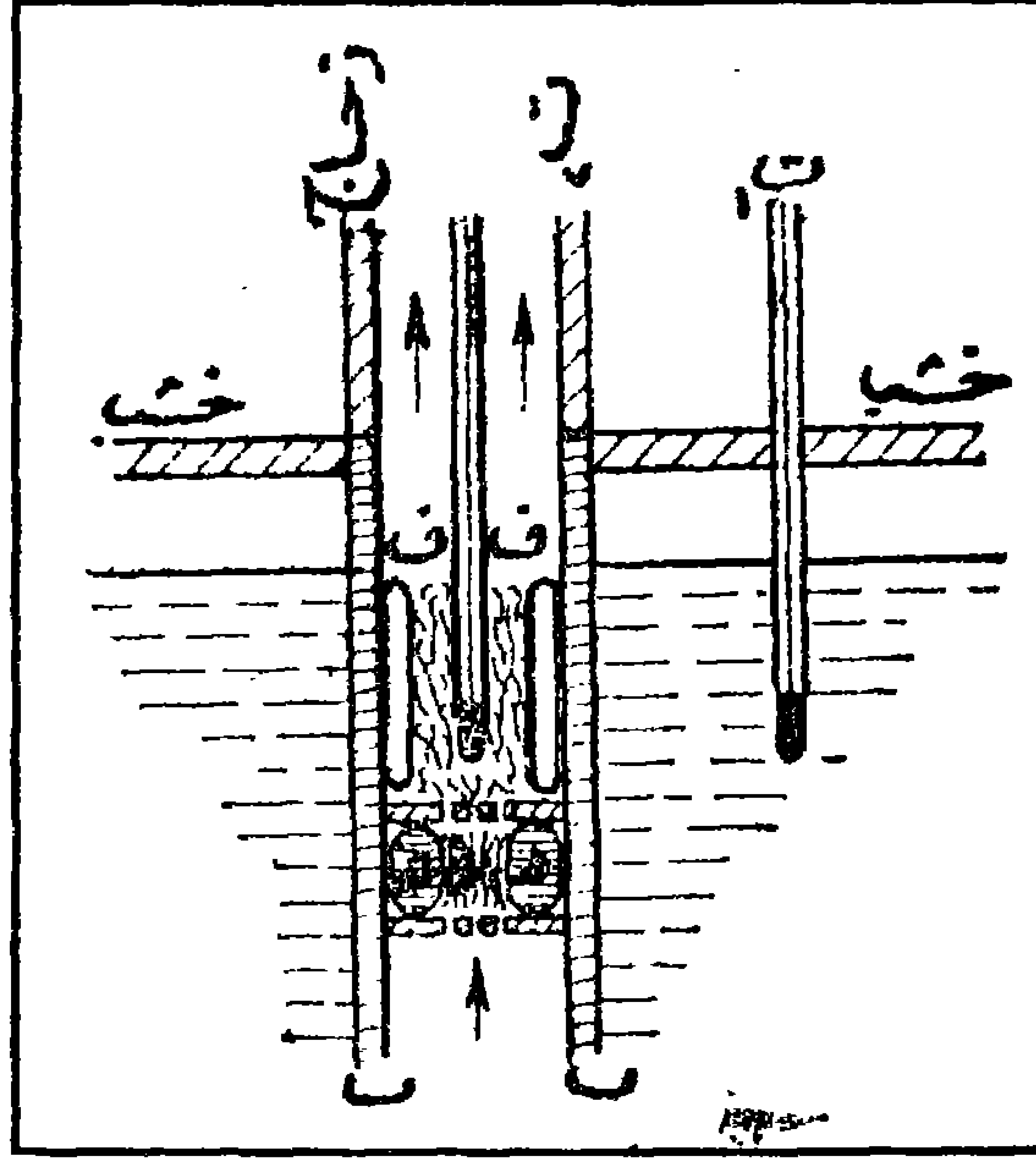
المثال الأول: ظاهرة جول وكلفن:

لقد أوجد ماير Mayer في سنة 1842 قيمة للمكافئ الميكانيكي الحراري مؤسسة على فرض أنه عند ضغط الغاز تتساوى الحرارة المتولدة والشغل المبذول أثناء الضغط ولامتحان هذا الفرض اقترح طومسن تجربة العائق ذي المسام Porous plug ولقد قام هو وجول على تنفيذ هذا الاقتراح عملياً بسلسلة تجارب أثبتت نتائجها أنه لو كان الهواء في درجة 10° مئوية وزيد ضغطه من 1 إلى 4.7 لازدادت الحرارة المتولدة على الشغل المبذول أثناء الضغط بنحو $\frac{1}{174}$ من قيمته ولو استعيض عن الهواء بحامض الكاربونيك لازدادت الحرارة المتولدة على الشغل المبذول بنحو $\frac{1}{32}$ من قيمته غير أنه لو وضعنا أيدروجينا عوضاً عن الهواء لعكست الآية ورأينا نقصاً في الحرارة المتولدة عن الشغل المبذول بمقدار $\frac{1}{630}$ من قيمته وعليه يظهر أنه عند الضغط وليكن ضغط الهواء تتولد حرارة تتكافأ بعضها والشغل المبذول أما البعض الآخر أو الحرارة الزائدة فآتية من الطاقة الداخلية للغاز وقبل أن نبحث هذه الظاهرة أعني ظاهر جول وكلفن من الوجهة النظرية نصف التجربة التي أجريت.

يضغط الغاز الذي يراد أن تجري عليه التجربة داخل أنبوبة لا تسمح للحرارة أن تنفذ منها ويوضع في الأنبوبة عائق من القطن الصخري Cotton wool أو فتايل من الحرير ثم تعرف درجة الحرارة ومقدار ضغط الغاز على جانبي العائق بدقة.

ويلاحظ أن ضغط الغاز أكبر بكثير قبل المرور بالعائق عن بعد اختراقه وعليه فهناك تمدد سريع أثناء الاختراق. ولقد وجد أن الغاز يبرد قليلا بمروره في العائق غير أنه لوحظ تسخين بسيط في حالة الايدروجين.

يبين شكل (1) آخر جهاز استعمله جول وطومسن للتحقق من النتائج السابقة.



شكل 1

يضغط الغاز داخل ملف من أنابيب النحاس مغموسة في حمام ماء تعرف درجة حرارته بواسطة الترمومتر ت1، ب ب هو النهاية العليا لأنبوبة نحاس حـ حـ هما لوحان معدنيان. بثقبان بينهما حلقة من المطاط هـ هـ تحوى عائقاً من الحرير س يمكن ضغطه إلى درجة ما بضغط حـ حـ إلى بعضهما، ف ف هي حلقة من الفلين لمنع التوصيل الحراري بالحمام ويحفظ القطن الصخري مفككاً داخل حلقة الفلين ويقيس الترمومتر ت2 درجة الحرارة عندما يخرج الغاز من العائق ويقاس ضغط الغاز عند الدخول بمقياس ضغط يوصل بالملف النحاسي أما الضغط عند الخروج فمعروف لأن مقداره يساوي الضغط الجوي.

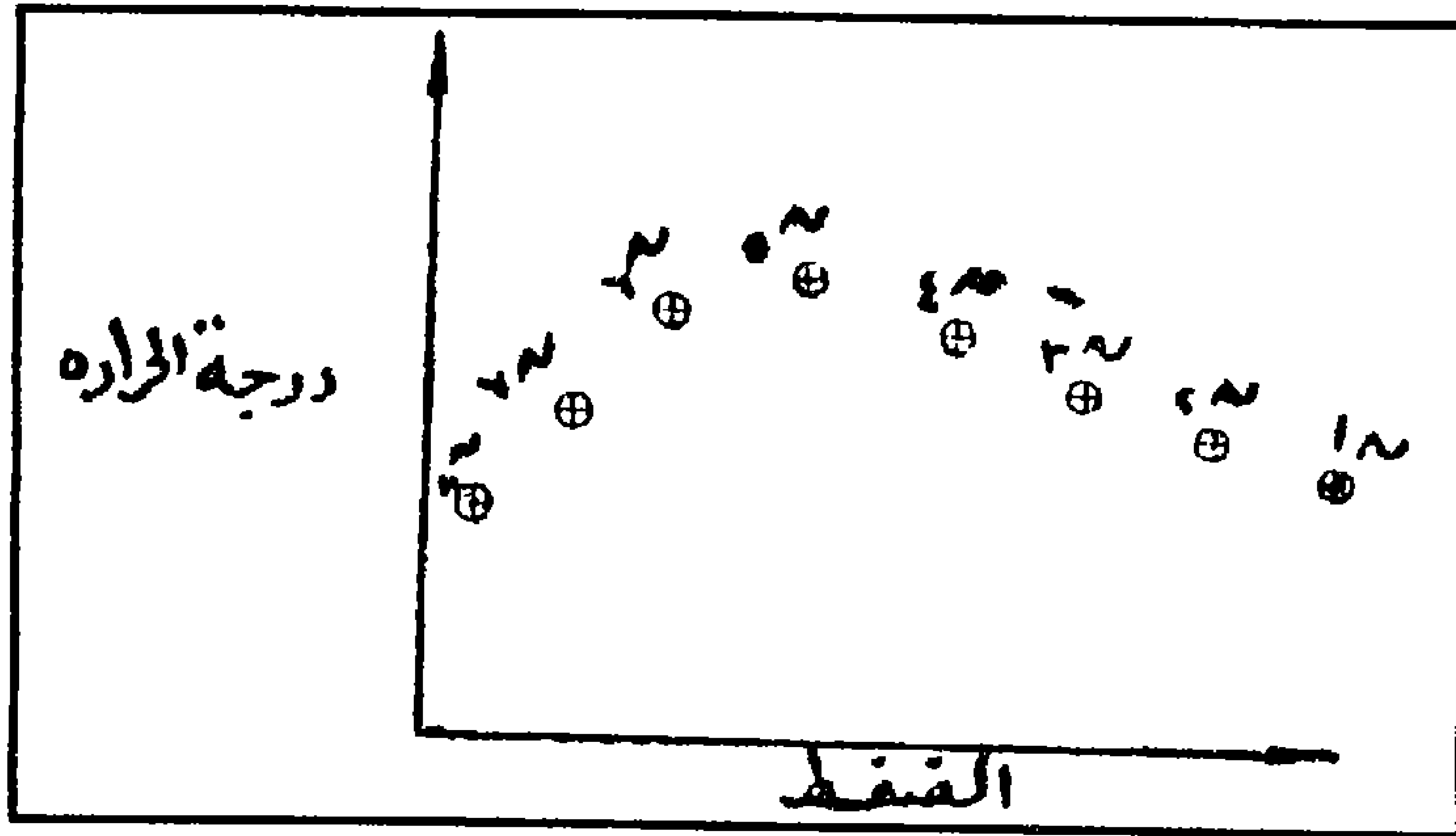
تتبع الخطوات الآتية عند إجراء تجربة دقيقة بجهاز دقيق:

أولاً: ضع الغاز في الناحية ذات الضغط العالي ص أ عند درجة حرارة مناسبة ولتكن د أ ثم اختر قيمة للضغط من الناحية الأخرى ذات الضغط المنخفض وليكن ص ن (1) تلاحظ أن الغاز يخرج بعد تسربه من العائق بدرجة حرارة أخرى. قس هذه الدرجة ولتكن د ن (1).

ثانياً: اترك الضغط في الناحية ذات الضغط العالي كما هو كذلك أترك درجة الحرارة في هذه الناحية كما هي وغير قيمة الضغط في الناحية ذات الضغط المنخفض إلى قيمة جديدة ولتكن ص ن(2) تلاحظ أن الغاز يخرج بعد تسربه من العائق بدرجة حرارة جديدة قس هذه الدرجة ولتكن د ن(2).

ثالثاً: غير قيمة الضغط مرة أخرى في الناحية ذات الضغط المنخفض إلى قيمة جديدة ولتكن ص ن(3) تلاحظ أن الغاز يخرج بدرجة حرارة جديدة ولتكن د ن(3) واستمر في العملية مغيراً الضغط النهائي ومعيناً درجة الحرارة الأخيرة حتى تحصل على أكبر عدد ممكن من القيم.

رابعاً: ضع النتائج التي حصلت عليها في رسم بياني تراها تأخذ وضعاً كما في الشكل (2).



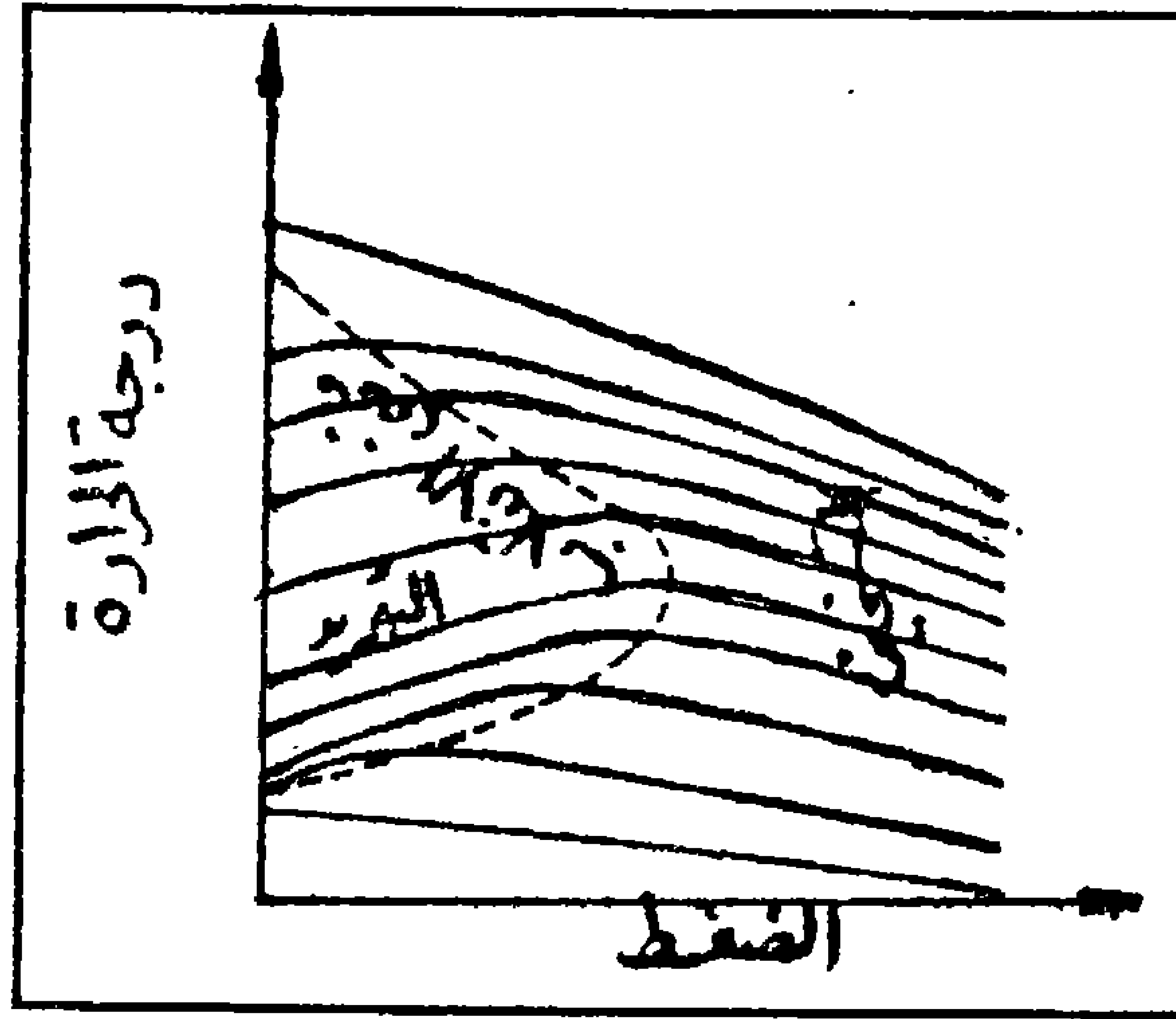
الشكل 2

نظرة فاحصة إلى الشكل نرى أنه ربما كانت عملية التسرب مصحوبة بنقص في درجة الحرارة أو زيادة أو عدم تغير فيها فمثلاً لو كانت النقطة النهاية هي ن (3) كان هناك زيادة في درجة الحرارة ولو كانت ن (8) كان نقصاً .

خامساً: صل هذه النقط لتكون منحنياً يسمى منحنى تساوي الاحتواء isenthalpic أكرر مرة أخرى أن هذا المنحنى لا يمثل عملية التسرب ولكنه المحل الهندسي لجميع النقط التي تمثل الأوضاع المتزنة التي تتساوى في مقدار الاحتواء.

سادساً: أعد جميع الخطوات السابقة مع جعل نقطتي الابتداء ص ا، رَ ا أعني أعد جميع الخطوات السابقة مع تغير درجة الحرارة الابتدائية فقط تحصل على منحنى جديد لتساوي الاحتواء.

سابعاً: كرر العمليات السابقة لتحصل على جملة منحنيات كما في الشكل (3).



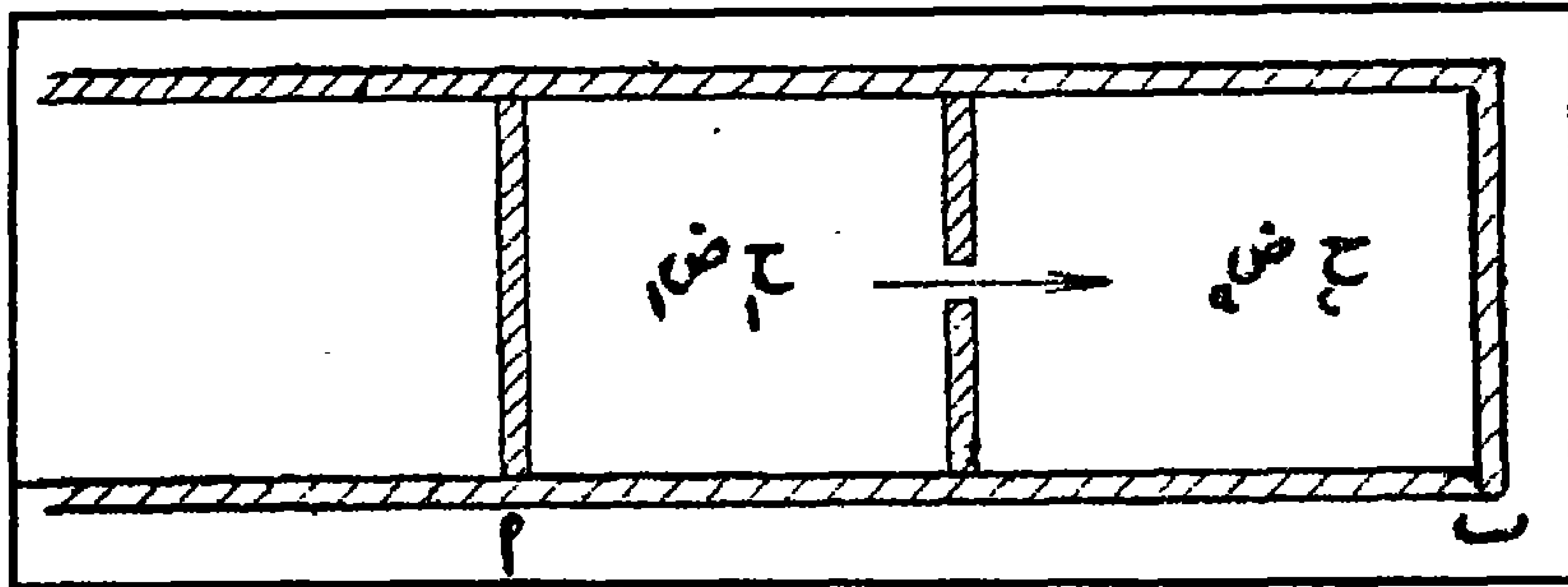
شكل 3

نظرة فاحصة إلى الشكل تجد أنه من السهل معرفة القيم التي يجب أن تختار من ص ا، ر ا، ص ن حتى تحصل على قيمة للمقدار رن أقل من را أعني حتى تحصل على ظاهرة تبريد، أن المقدار العددي لميل منحنى تساوي الاحتواء عند أي نقطة يقال له معامل جول – كفلن وهو $\left[\frac{6\ د}{6\ ص}\right]_{ح\ ر}$ والمحل الهندسي لجميع النط التي يتلاشى

عندها معامل جول – كلفن يسمى منحنـى الانقـلاب Inversion Curve وهـو المحـل الهندسي للنهايات العظمى لمنحنيات تسـاوي الاحتـواء. ويلاحـظ أن المنطقـة الـتي في داخل المنحنى حيث المعامل موجب منطقة تبريد والمنطقة التي في خارجه حيث المعامل سالب منطقة سخونة.

البحث النظري:

سنطبق أولاً قانوني الديناميكا الحراري ثم بعد ذلك نريك كيـف يمكـن اسـتنتاج بعض الحقائق باستعمال إحدى علاقات ماكسويل.



شكل 4

إذا اندفع غاز مخترقاً فتحة صغيرة من ضغط عـالي إلى ضـغط مـنخفض وكانـت جوانب الأوعية أو الأنابيب الحاوية للغاز غير موصلة للحرارة فإن ح و تبقى ثابتة ولا تتغير لأن العملية عملية تسرب وإن اختلفت بعض الشيء عما وصفا ولإثبـات ذلـك اجعل أ (الشكل 4) وهو عبارة عن ضاغط متحرك يدفع حجمـا $ح_1$ مـن الغـاز عنـد ضغط $ص_1$ داخل الفتحة حيث يصبح الحجم الجديد $ج_2$ عند ضغط $ص_2$ بعد المـروق من الفتحة ($ص1 > ص_2$) فإن الشغل المعمـول بواسـطة أ علـى الغـاز هـو $ح_1 ص_1$ والشغل المعمول بواسطة الغاز على الجدار الثابت ب هو $ج_2 ص_2$.

$$\therefore د ي = ح_2 ص_2 - ح_1 ص_1$$

ولكن د ح = د ى + د ي

دار جرير للنشر والتوزيع

وحيث أنا فرضنا أن لا تخترق الحرارة جدران الأنبوبة والضاغط فالمقدار

د ح = صفراً

وينتج أن د ى + ي = صفراً

وبتطبيق هذه المعادلة على حالتنا نرى أن:

$(ى_2 - ى_1) + (ح_2 ص_2 - ح_1 ص_1) = $ صفراً

$\therefore ى_2 + ح ص_2 = ى_1 + ح_1 ص_1$

أي أن $2_{ح و} = 1_{ح و}$

ومعنى هذا أنه في هذه العملية لا تتغير ح و بمرور الغاز في العائق.

وحيث أن د ح و = د (ى + ح ص) = د ى + ص د ح + ح د ص

= د ح + ح د ص

كذلك د ح = $ℭ_{ص}$ د **د** − **د** $\left(\frac{\sigma ح}{\sigma د}\right)$ ص

[معادلة **د** د ے الثانية]

$\therefore$ د ح و = $ℭ_{ص}$ د **د** + { ح − $\left(\frac{\sigma ح}{\sigma د}\right)$ ص } د ص

ولكنا بينا ثبات ح و أو بعبارة أخرى لقد بينا أن د ح و = صفراً

$\therefore$ يمكننا أن نكتب

$ℭ_{ص} \left(\frac{د د}{د ص}\right)_{ح و} = د \left(\frac{\sigma ح}{\sigma د}\right)_{ص} - ح$ .... (1)

ولكن $\left(\frac{د د}{د ص}\right)_{ح و}$ هو انخفاض درجة الحرارة لكل انخفاض في الضغط مقداره الوحدة تحت شروط العملية ولقد جعلناه مقياساً لظاهرة التبريد وهو معامل جول – كفلن كما بينا وعليه فظاهرة التبريد تساوي:

$$\frac{1}{ن_{ص}}\left\{\left(\frac{\sigma ح}{\sigma د}\right)ص - ح\right\}$$

ويسهل أن نرى أن ظاهرة التبريد لغاز كامل يتبع قانون بويل ح ص = ر د تساوي صفراً. ومعنى هذا انطباق فرض ماير على الغاز الكامل ويقول هذا الفرض كما سبق أن بينا أن الطاقة الداخلية لغاز هي دالة لدرجة الحرارة فقط ولا تعتمد على الضغط والحجم.

نعود الآن إلى الاحتواء الحراري ونطبق عليه العلاقة الرابعة ونبحث ما نحصل عليه من نتائج.

أما التغير في الاحتواء الحراري د ح و = د ح + ح د ص

ومن هذا التغير يمكن أن نستنتج بوضع د ح = د د ے

$$\text{أن } \left(\frac{\sigma ح ت}{\sigma ص}\right)_{د} = د \left(\frac{\sigma}{\sigma ص}\right)_{د} + ح \text{ .... (2)}$$

وباستعمال العلاقة الرابعة لماكسويل (معادلة 7) تأخذ المعادلة (2) الصورة

$$\left(\frac{\sigma ح_{و}}{\sigma ص}\right)_{د} = - د\left(\frac{\sigma ح}{\sigma د}\right)_{ص} + ح \text{ .... (3)}$$

وباستعمال المعادلة (1) يمكن كتابة المعادلة (3) في الصورة الآتية:

$$ن_{ص}\left(\frac{د د}{د ص}\right)_{ح و} = - \left(\frac{\sigma ح_{و}}{\sigma ص}\right)_{د} \text{ .... (4)}$$

وهذا وضع آخر لظاهرة جول وكلفن فإذا حللنا الطرف الأيسر إلى جزءيه بأن نضع

$$\left(\frac{\sigma \text{ح}_{\text{ر}}}{\sigma \text{ص}}\right)_{\text{د}} = \left(\frac{\sigma \text{ى}}{\sigma \text{ص}}\right)_{\text{د}} + \left[\frac{\sigma (\text{ح ص})}{\sigma \text{ص}}\right]_{\text{د}} \quad \text{.................................} \quad (5)$$

لوجدنا المعادلة (4) تأخذ الصورة الآتية:

$$\text{ص}\left(\frac{\sigma \text{د}}{\sigma \text{ص}}\right)\text{ح}_{\text{ر}} = -\left(\frac{\sigma \text{ى}}{\sigma \text{ص}}\right)_{\text{د}} - \left[\frac{\sigma (\text{ح ص})}{\sigma \text{ص}}\right]_{\text{د}} \quad \text{...........................} \quad (6)$$

وتبين لنا هذه المعادلة متى يكون التبريد في هذه الظاهرة ومتى يكون التسخين ويمثل الحد الأول من الطرف الأيسر الانحراف عن قانون جول أو فرض ماير القائل بأن الطاقة الداخلية لغاز عند درجة حرارة ثابتة لا تعتمد على الضغط أو الحجم ويمثل الحد الثاني الانحراف عن قانون بويل القائل بأن حاصل ضرب الحجم والضغط ثابت لا يتغير بتغير الحجم أو الضغط عند درجات الحرارة الثابتة.

نعود إلى الحد الأول $\left[\frac{\sigma \text{ى}}{\sigma \text{ص}}\right]_{\text{د}}$ فنراه دائماً سالباً لأن الطاقة الوضعية لقوى التجاذب بين الجزئيات تقل بنقص الحجم أو بزيادة الضغط وعليه فإن الحد الأول مسبوقاً بالعلامة السالبة كمية موجبة دائماً وحيث أن وضع التجربة يجعل الضغط يبدأ من علو إلى انخفاض أعني أن د ص كمية سالبة وعليه فالتغير في درجة الحرارة ء د الذي يظهر نتيجة للانحراف عن قانون جول واجب أن يكون سالباً ليكون الطرف الأيمن موجباً حتى يتفق والحد الأول في الطرف الأيسر ومعنى هذا أن هناك ظاهرة تبريد ناتجة عن انحراف الغاز عن قانون جول. نعود إلى الحد الثاني $\left[\frac{\sigma (\text{ح ص})}{\sigma \text{ ص}}\right]$ فنراه طورا سالباً وطوراً موجباً حسب الغاز وشروط ضغطه وعلى كل فإن هذا الحد سالب على وجه التغليب عندما يكون الضغط منخفضاً ودرجة الحرارة منخفضة وعند ذلك تكون الظاهرة الناتجة عن الانحراف عن قانون بويل ظاهرة تبريد تزيد التبريد الناتج

عن الانحراف عن قانون جول ولكن إذا كان الحد موجباً فإن الظاهرة الناتجة عن الانحراف عن قانون بويل تكون ظاهرة تسخين تعمل عكس عمل التبريد الناتج عن الانحراف عن قانون جول.

وفي هذه الحالة الأخيرة لابد أن يكون هناك ضغط وسط ودرجة حرارة معينة يتساوى عند تأثير الظاهرتين ظاهرة التبريد وظاهرة التسخين فلا يظهر تسخين أو تبريد وتسمى درجة الحرارة هذه درجة حرارة الانقلاب Inversion Temperature عند الضغط المعطى وبديهي أن تغلب ظاهرة التسخين ظاهرة التبريد إذا ارتفعت درجة الحرارة عن درجة الحرارة الانقلاب وتغلب ظاهرة التبريد ظاهرة التسخين إذا انخفضت درجة الحرارة عن درجة حرارة الانقلاب.

مثال ثان معادلة كلابيرون Clapeyron

يمكن الحصول على علاقة ما بين الحرارة الكامنة وبعض الخواص الطبيعية لمادة ما بطرق مختلفة ولعل أبسط هذه الطرق تطبيق معادلة ما كسويل الثانية (5).

ولتطبيق هذه المعادلة واجب أن نعرف التغير في الحجم ثم التغير في الانتروبيا الحرارية أما التغير في الحجم ء ح فهو فارق ما بين الحجم النوعي في الحالة النهائية والحجم النوعي في الحالة الابتدائية أعنى د ح = $(ح_2 - ح_1)$.

نعود إلى التغير في النسبة الحرارية ونقول أن قيمته تساوي $\frac{ح_ك}{د}$ حيث أن ح ك هي الحرارة الكامنة وهي الحرارة التي تعطى للجسم حتى يتحول من حالة إلى أخرى مع ثبات درجة الحرارة وليكن من حالة السيولة في درجة الحرارة د إلى حالة الغازية في نفس الدرجة مثلاً.

إذن تصبح علاقة ماكسويل الثانية في الصورة الآتية:

$$\frac{ح_ك}{د} = (ح_2 - ح_1)\left(\frac{دص}{دد}\right)_ح \quad \text{.................................. (4)}$$

وأول من حصل على هذه المعادلة كلابيرون ولذا سميت باسمه ويمكن أن تمتحن صحتها عملياً ببحث تغير درجة حرارة نقطة ذوبان الثلج إذا زيد الضغط عليه بقيمة مقدارها جوى واحد. في هذه الحالة نجد أن:

$ح_1$ = الحجم لجرام واحد من الثلج عند درجة صفر مئوي = 1.0908سم3

$ح_2$ = الحجم لجرام واحد من الماء عند درجة صفر مئوي = 1.0001 سم3

$ح_ك$ = الحرارة الكامنة للثلج.............................. = 80 سعر / جرام

د = درجة الحرارة المطلقة لذوبان الثلج .... – 273.1° مطلق

د ص = التغير في الضغط 96 × 13.59 × 981 ثانية / جرام/ سم فرضاً

وعليه فبالتعويض في المعادلة (6) نجد أن:

$$د\,د = - \frac{981 \times 13.59 \times 76 \times 0.0907 \times 273.1}{{}^{7}10 \times 4.185 \times 80}$$

= – 0.00750° درجة

ولقد حقق هذه النتيجة كلفن فوضع خليطاً من الماء والجليد في أنبوبة من حديد وضغطه بواسطة ضاغط لولبي ثم قاس درجة الحرارة والضغط فرأى أن درجة ذوبان الثلج تنخفض بمقدار 0.00735 درجة كلما زاد الضغط قيمة مقدارها جوى واحد.

تطبيق معادلة كلابيرون:

يمكن تطبيق هذه المعادلة على انبعاث الكهرباء من الأجسام الساخنة.

إذا فرضنا لوحاً في الهواء وعلى بعد من سلك من البلاتين في درجة الإحمرار فإننا نلاحظ تكون شحنة موجبة على اللوح تنقص في المقدار كلما ارتفعت درجة حرارة

السلك وتنعدم عندما يكون السلك في درجة البياض ولكن إذا أعيدت التجربة السابقة في غير الهواء الطلق بل في هواء مخلخل كأن يوضع اللوح والسلك في وعاء ضغط الهواء فيه منخفضاً نجد اللوح يحوى شحنة موجبة ولكنها أقل مقداراً عنها في حالة الهواء الطلق وتقل أيضاً مع ارتفاع درجة حرارة السلك حتى تنعدم ولكنها تغير علامتها فتصبح شحنة سالبة لو زيدت درجة حرارة السلك عند الدرجة التي تنعدم عندها الشحنة الموجبة، غير أن الشحنة السالبة عكس الشحنة الموجبة تزداد كلما ازدادت درجة حرارة السلك، وتعليل هذه الظاهرة واضح إذ عزيت الشحنة الموجبة إلى انبعاث أيونات موجبة من السلك الساخن ولعل منشأها كميات قليلة من المعادن والغازات عالقة بالسلك كشوائب يفصلها التسخين عنه، وبديهي أن معدل الانبعاث يقل بقلة الكمية الدخيلة الموجودة في السلك والتسخين يقلل من هذه الكمية، وعليه فمعدل انبعاث الشحنات الموجبة يقل بالتسخين، أما الشحنة السالبة فقد ثبت أنها كهارب تترك الجسم الساخن وكلما سخن الجسم كلما زاد الانبعاث وموضوع حديثنا الآن هو انبعاث هذه الكهارب من الأجسام الساخنة. إذا وضعنا في وعاء مفرغ من الهواء جسماً في حالة سخونة تخرج منه كهارب وترتد إليه بعضها وأنى لم أتعرض هنا لسبب رجوع الكهارب إلى الجسم ثانية فربما يكون ذلك لتنافرها مع سحابة منها تكونت بالقرب من الجسم الساخن ولكن المهم إذا وضع الجسم كما قلت فإنه يصل إلى حالة الاتزان عندما يكون عدد الكهارب التي تتركه قدر عدد الكهارب التي تعود إليه وهنا تتشابه حالة الجسم الساخن والكهارب بحالة السائل والبخار وهما في حالة اتزان وعليه يمكننا أن نستعمل في حالتنا هذه معادلة كلابيرون بعد أن نترجمها إلى لغة الكهرب فبتطبيق المعادلة:

$\frac{ح_ك}{د} = (ح_2 - ح_1) \frac{د\,ص}{د\,د}$ على حالتنا يجب أن نعتبر ح ك الحرارة الكامنة لتبخر الكهارب.

، ($ح_2 - ح_1$) ما يطرأ على الحجم النوعي للكهارب من تغير أثناء تبخرها

، ص ضغط الكهارب عندما تكون في حالة اتزان.

ولكن حيث أن الحجم النوعي ح1 صغير جداً يمكن إهماله بالمقارنة مع ح2 فيمكن أن نكتب معادلة كلابيرون في الصورة الآتية:

$$\frac{ح_ك}{د} = ح \frac{د\ ص}{د\ د} \quad \text{.. (7)}$$

حيث ح هو الحجم النوعي للكهارب وهي خارج الجسم أعني بعد التبخر.

والآن نفرض أن الكهارب بعد تبخرها من الجسم تتصرف تصرف الغاز ومعنى هذا الفرض أننا أهملنا التأثير الناتج عن تنافر الكهارب من بعضها أعني أننا فرضنا أن درجة تركيز الكهارب في الجو المحيط بالجسم ضعيف جداً وعليه يحق لنا أن نطبق عليها القوانين العادية للغازات لنحصل على الضغط من قانون بويل ح ص = ر د ولكن

$$ح = \frac{\text{عدد الكهارب في جرام جزئي}}{\text{عدد الكهارب في وحدة الحجوم}} = \frac{ن.}{ن}$$

$$\therefore\ ص = ن \times \frac{ر}{ن.} د = ن\ ب\ د \text{..................................ز (8)}$$

حيث ب هو ثابت بولتسمان Boltzman

ولكن يجب أن يعمل مقدار معين من الشغل حتى يطرد كهرب من الجسم ولنرمز من لهذا الشغل بالرمز ϕ. وعليه يصبح التغير في الطاقة الداخلية الناتج عن تبخر الكهارب الموجود في الحجم ح مساوي ن ح ϕ، غير أن الحرارة الكامنة تساوي التغير في الطاقة الداخلية مضافاً إليه الشغل المعمول ضد الضغط الخارجي أثناء التمدد، ولقد عرفنا مقدار التغير في الطاقة الداخلية وكذلك مقدار الشغل المعمول ضد الضغط الخارجي يساوي ح ص.

وعليه نكتب الحرارة الكامنة في الصورة الآتية:

$$\text{ح ك} = \text{ن ح}\ \phi + \text{ح ص} \quad \text{.........} \quad (9)$$

وبالتعويض في المعادلة (7) نجد أن:

$$\text{ن ح}\ \phi + \text{ح ص} = \text{د ح}\ \frac{\text{د ص}}{\text{د د}}$$

$$\text{أعني ن}\ \phi + \text{ص} = \text{د}\ \frac{\text{د ص}}{\text{د د}}$$

وبالتعويض عن قيمة ص من المعادلة (8) نجد أن:

$$\text{ن}\ \phi = -\ \text{ن ب د} + \text{د}\ \frac{\text{د(ن ب د)}}{\text{د د}}$$

$$= \text{ب د}^{2}\ \frac{\text{د ن}}{\text{د د}} \quad \text{.........} \quad (10)$$

وبالتكامل نجد أن:

$$\text{ن} = \text{ن}_{1} \int \frac{\phi}{\text{ب د}^{2}}\ \text{د د} \quad \text{.........} \quad (11)$$

حيث ن_{1} هو ثابت التكامل.

ولكن الغاز الكهربي في حالة اتزان أعني أن عدد الكهارب العائدة إلى وحدة السطوح في الثانية نَ هو عدد الكهارب المنبعثة من وحدة السطوح من الجسم في الثانية وتعطى كما يأتي نَ = ن لة (د) (12).

حيث له (د) دالة من دوال درجة الحرارة وتتناسب مع د^{2} وبالتعويض في المعادلة (11).

$$\text{نجد أن: نَ} = \text{ن}_{1}\ \text{لة (د) ن}_{1}\ \text{لة (د)} \int \frac{\phi}{\text{ب د}^{2}}\ \text{د د}$$

ونحصل على التيار الخارج من وحدة السطوح بضرب كل من الطرفين في شك شحنة الكهرب

$$\therefore \text{ت} = \text{نَ شك} = \text{شك ن}_1 \text{ لة (د)} \int_{\text{م}}^{\text{دُ}} \frac{\phi}{\text{ب د}^2} \text{ د د}$$

وإذا فرض أن ϕ لا تتوقف على درجة الحرارة يمكننا أن نضع المعادلة الأخيرة في الصورة الآتية:

$$\text{ت} = \text{ن}_1 \text{ شك لة (د) هـ}^{\frac{-\phi}{\text{ب د}}}$$

ولقد وجد كما قلت أن لة (د) تتناسب مع د $^{\frac{1}{2}}$

$$\therefore \text{ت} = \text{أ}_1 \text{ د}^{\frac{1}{2}} \text{ هـ}^{\frac{\text{أ}_2}{\text{د}}} \quad \text{...} \quad (13)$$

وهذا هو قانون ريتشاردسن (Richardson).

دار جرير للنشر والتوزيع

الفصل الثاني عشر

موجات الضوء

الفصل الثاني عشر

موجات الضوء

مصدر الإشعاع صدمة مباشرة أو غير مباشرة لأحد الجسيمات الأثيرية التي يصح أن تسمى بالأثيريات أو بالأدقات طالما أنها أدق من أدق جسيمات معروفة أو مستنتجة في أي فرع من العلوم.

فباهتزاز إحدى الأدقات تتأثر ما حولها وتنتشر الموجات الأثيرية هكذا في كرات مركزها مصدر الإشعاع أما الأشعة فتكون على خطوط مستقيمة فاهتزازات مصدر الإشعاع أما الأشعة فتكون على خطوط مستقيمة فاهتزازات مصدر الإشعاع تجعل المسافة بينها وبين ما بجوارها من الأدقات تنقص ثم تزيد وتتابع هذه الحركة في دوائر حول المصدر فالموجات الأثيرية موجات طولية أي تسري نتيجة لتضاغط وتخلخل في الهيكل الأثيري الشبكي المتناهي في الدقة وفي كثرة عدد مكوناته المتماسكة مع بعضها بتأثير التجاذب كثرة تكاد أن تكون لا نهائية.

وفي حالة إنبعاث الضوء من التفاعلات الكيمائية مثل الاشتعال فإن ما حول مصدر الإشعاع إما أن تكون مادة غير متفاعلة، وإما أن تكون مادة متفاعلة وحولها كرات أمواجها. لذلك لا ريب أن الكرات تتداخل فلا تبقى منها إلا مخروطات مختلفة المراكز. وينتج من تداخل تلك المخروطات مع بعضها منذ البداية ضعف البعض منها في بعض أجزائه أو إنعدامها في حالة تعارض الذبذبات على أدق واحدة في طريق الشعاع، الأمر النادر الحدوث بالطبع لكثرة الأثيريات كثرة متناهية حتى ليستحيل عملياً شغلها جميعاً بالموجات الأثيرية على اختلاف أنواعها، إلا في حالات التفاعل الذري مثلاً.

من كل هذا تنتج أشعة الضوء أو غيره من الإشعاعات الأثيرية التي تنبعث من المصدر في جميع الاتجاهات وفي خطوط مستقيمة وكل شعاع منها له ذبذبة واحدة واتجاه واحد. وكل هذه الأشعة ليست متماثلة ولا متشابهة في مساحة مقطعها ولا في عدد ذبذباتها للأثير في الثانية الواحدة. فمقطع كل منها ناتج من الظروف والصدف المحيطة به والمكونة له، وليس له شكل معين أما عدد ذبذباتها في الثانية الواحدة أي تردد كل منها فناتج عن طبيعة الصدمة الأساسية قبل كل شيء وإن كان عرضة للتغير عند تداخله مع شعاع آخر الأمر القليل الحدوث بالفعل والقليل الاحتمال أيضاً. ولعل هذا هو السر في أن كل تفاعل كيميائي تغلب على اللهب الناتج عنه ألوان معينة لاسيما تحت ذات ظروف التفاعل. فطبيعة الصدمات لا يمكن أن تتغير إلا بتغير ظروف التفاعل على الأقل. وهي التي تحدد تردد الشعاع الواحد فتسبب الإحساس بلونة المميز.

فإذا ما اختلطت أشعة ذات ألوان متعددة كان تأثير سرعات اهتزازها منعكساً على الجهاز البصري، شعوراً بلون آخر قد يكون اللون الأبيض في حالة ما إذا اختلطت أشعة بها جميع ألوان الطيف لأن الجهاز البصري على دقة إحساسه لا يمكنه التمييز بين شعاع وآخر لتناهي صغر مساحة المقطع ولصغر المسافة بين الشعاع والآخر. كما أن تبادل الأشعة بسرعة كبيرة يوجد الإحساس باللون الناتج عنها جميعاً لبقاء الصورة في الجهاز البصري كسراً من الثانية يساوي عشرها تقريباً. وهذه الخاصية هي المستعملة في أشرطة السينما حيث تتغير الصور بسرعة حتى يخيل للرائي أنها صور متحركة. ودائماً تعطى سرعة الاهتزازات الخاصة بالألوان إحساساً بكل منها.

يختلف كل شعاع عن الشعاع الملاصق له ويتميز عنه في كل شيء في مساحة المقطع وفي شكل هذا المقطع وفي مكان التضاغط والتخلخل عليه وفي التردد وبالتالي في طول الموجة إن اختلف اللون إلا أن جميع الأشعة الضوئية بل جميع الأشعة الأثيرية تسري بسرعة ثابتة في الأثير الواحد.

سرعة الموجات الأثيرية = التردد × طول الموجة.

فمهما كان مصدر الموجات الأثيرية، بل مهما كان نوعها أو طول موجتها فإنها جميعاً تسري بسرعة الضوء. وما التردد أو طول الموجة إلا مميزاً لها عن سواها في خواصها الأساسية من فوق ضوئية إلى حرارية إلى لاسلكية أو مميزاً لها عن سواها في خواصها الثانوية مثل اللون أو النوع الفرعي أياً كان. بل أن طاقة ذلك التردد هي التي تؤثر في الأوساط المادية بآثار الموجة الأثيرية المعينة على اختلاف تلك الآثار.

وأقصر الموجات وأعلاها تردداً هي الموجات الفوق ضوئية والتي تليها هي الموجات الضوئية وتليها الموجات الحرارية، أما أطول الموجات وأقلها تردداً فهي الموجات اللاسلكية.

وبالنسبة لموجات الضوء خاصة تكون أقصرها البنفسجية وأطولها الحمراء وترتيبها كما يلي: بنفسجي فأزرق فأخضر فأصفر فأحمر. وفي الطيف الشمسي أشعة غير منظورة أهمها الفوق بنفسجية من جهة وتحت الحمراء من الجهة الأخرى وهي ذات تأثير حراري وإن كان نصف الطيف الشمسي لا يخلو من التأثيرات الحرارية لتداخل الخواص حتى عند تساوي طول الموجات الحرارية المتخللة مع طول الموجات الضوئية كما أن بعض الأشعة المنظورة يكون لها تأثير حراري بدرجات طفيفة بخلاف اللون. وأشهر الموجات الفوق ضوئية بعد الفوق بنفسجية هي الأشعة السينية وأشعة الراديوم ولعل أقصر الموجات الأثيرية على الإطلاق هي الأشعة الكونية الغامضة ذات قوة التخلل والنفاذ إلى مسافات بعيدة في المواد.

فالإشعاعات والضوء والحرارة واللاسلكي فروع من أصل واحد. فكلها موجات أثيرية تنتقل خلاله بسرعة الضوء وهي سرعة ثابتة خلال الأثير الواحد. فإذا ما صادفت وسطا مادياً اختلفت في خواصها تبعاً لنوع ذلك الوسط المادي وظروف ما تحويه من الأثيريات. فالإشعاعات الفوق ضوئية تتخلل جميع المواد بدرجات متفاوتة بينما لا يتخلل الضوء إلا المواد الشفافة فقط، أما الحرارة فلا تتخلل أي مادة إلا

الشفافة لها أو الشفافة للضوء في أكثر الحالات، إلا إذا ما جعلت تلك المادة تشع بدورها موجات حرارية. فكأنما هي في حالة التزهر الضوئي حين لا يتخلل الضوء المادة المتزهرة وإنما يجعلها تشع ضوءاً جديداً. وأخيراً توجد الموجات اللاسلكية التي تتخلل كل المواد تقريباً بدرجات متفاوتة ما عدا كتل النحاس.

وهنا تتباين سرعات الأمواج الأثيرية وتختلف عن بعضها بعد أن كانت جميعها متساوية وتساوي سرعة الضوء في الفضاء. ويكون اختلافها في الأوساط المادية، وفي كل وسط مادي تبعاً لحالة الأثير خلاله كما هو معروف من التجارب المختلفة وبخاصة عن سرعة موجات الضوء المختلفة خلال المواد الشفافة، والتجارب عن الكثافة الضوئية، التي هي نتيجة عاملين اثنين: الكثافة الأثيرية خلال المادة، وجاذبية النقط المادية التي تتكون منها للأثيريات المتخللة لها. وكلا العاملان يتوقف على الكثافة النوعية للمادة من جهة وعلى درجة تركيز كتل نقطها المادية وكيفية توزيعها من الجهة الأخرى.

فلقد تبين أن سرعات الأمواج الأثيرية تختلف في الوسط لنادي الواحد تبعاً لمقدار التردد أو طول الموجة فكلما كان التردد الأصلي عالياً، كلما كانت السرعة في الوسط المادي أبطأ أو أن الموجات الطويلة أقل تأثراً بوجود الوسط المادي فلا تبطئ كثيراً خلاله. فلم تعد سرعة الموجات الأثيرية بل ولا حتى الموجات الضوئية المنظورة منها، لم تعد متساوية ولا ثابتة عندما تخللت الوسط المادي بعد أن كانت متساوية وثابتة في الفضاء أو بالأحرى خلال الأثير الحر.

فمع أن الموجات الأثيرية لن تزال تسبح خلال الأثير حتى في الوسط المادي كما كانت تسبح خلاله في الفضاء إلا أن الظروف المحيطة بالأثيريات في الوسط المادي غير ما كانت عليه في الفضاء. لقد قيد وجود النويات والإلكترونات والتركيب الجزيئي والترتيب البللوري للمادة من حرية ذبذبة الأثيريات التي بها وشغل الحيز عليها. فصار الذبذبات تضعف وتضمحل يعد مسافة ما بعد أن كانت تستمر في الفضاء كثيراً. كما

أن عدد الذبذبات في الثانية أي التردد نقص عما كان لكن معدل نقصه يتناسب بصفة عامة مع التردد الأصلي. فكلما كان التردد الأصلي كبيراً زاد معدل النقص فيه خلال الوسط المادي. بينما يبقى طول الموجة تقريباً كما هو بدون تغيير كبير. ومن المعادلة:

سرعة الضوء = التردد × طول الموجة

لذلك لا تبقى سرعة الضوء متساوية لجميع موجاته خلال المادة وإنما تصبح سرعة الموجات القصيرة منه أبطأ من سرعة موجاته الطويلة. وبالطبع يصبح متوسط سرعة الموجات الأثيرية خلال المادة أقل من سرعتها في الفضاء.

وثمة شيء آخر هو أن المسافات بين الأثيرية المتناهية في الصغر والتي يفترض وجودها افتراضا بين الأثيريات وبعضها، لابد أن تنقص لأن وجود المادة بنوياتها والكتروناتها شغل الحيز عليها بل إن قرب تلك الكتل المادية الصغيرة منها لابد وأن تزيد الجاذبية عليها مما يجعلها تتقارب علاوة على ما تقدم من تقييد حريتها في الذبذبة. من أجل هذا لابد أن يتأثر طول الموجات الأثيرية أيضاً خلال سريانها في الأوساط المادية فتنقص إلا أن نقصها هذا يكون بنسبة متساوية لجميع الأطوال وهذا غير ما يحدث لسرعة الذبذبات إذ أنها تنقص بمعدل كبير عندما تكون أصلاً في الفضاء ذبذبات عالية، وتنقص بمعدل صغير عندما تكون في الفضاء ذبذبات قليلة وذلك لتأثر الأدقات أو الأثيريات بجاذبية ما حولها من الجسيمات المادة التي تتألف منها الأوساط المادية.

ويكون مقدار التغير البسيط ذو النسبة الثابتة في أطوال الموجات الأثيرية نتيجة طبيعية للتغير البسيط في المسافات بين الأدقات التي تنتقل بواسطتها الموجات الأثيرية. فالتضاغط يعقبه تخلخل بعد عدد معين من الأدقات تقريباً في مثل تلك الموجات الطولية التي تسبح في الفضاء فإذا نقصت المسافات بين ذلك العدد من الأدقات تمت الموجة من تضاغط وتخلخل في مسافة أقصر.

هذا النوع من التغير البسيط ذو النسبة الثابتة في أطوال الموجات الأثيرية لا يؤثر في خواصها طالما أن التضاغط والتخلخل يتمان في نفس العدد تقريباً من الأدقات فإذا ما رجعت المسافات بين الأثيرية إلى ما كانت عليه عادت أطوال الموجات إلى ما كانت عليه. وذلك عندما تخرج الذبذبات من جديد إلى الأثير الحر.

وبالمثل لا يؤثر تغير التردد وإن اختلفت معدلاته في خواص الموجات الأثيرية على العموم لأن قوة التردد أو الطاقة التي تتردد بها كل الأدقات في طريق الشعاع تظل كما هي وكل ما في الأمر أن هنالك ما يكبت مؤقتا ذلك التردد لكن لا ريب في أن الموجات الأثيرية تتلاشى أثناء سريانها خلال الأثيريات المثقلة بالجاذبية في الوسط المادي وهي في تلاشيها لابد أن تفقد خواصها بالتدريج في بعض الحالات وبخاصة إذا كان في فقدان خواصها ما يكفل لطاقتها البقاء على صورة من الصور. ولا يوجد ما يمنع تحول بعض موجات الضوء ذات التردد البسيط إلى موجات حرارية فالفرق بين الأشعة الحمراء المنظورة وبين الأشعة تحت الحمراء الحرارية الغير منظورة فرق بسيط إذ أن الأشعة الحمراء لها تأثير حراري معروف كما أن خواص الموجات الأثيرية المتجاورة متداخلة كما تقدم بيانه. بالإضافة إلى أن تحول الترددات الغير مسموح بها إلى ترددات أقل منها سرعة ومقاربة لها يتمشى مع قوانين حفظ الطاقة ما دامت ترددات مسموح بها بكيفية ما.

لكن المهم هو أن قوة التردد أي الطاقة التي تتردد بها الأدقات على طول الموجة الأثيرية تظل خلال المادة كما كانت خلال الأثير فإذا ما زالت الظروف المادية المحيطة بالأدقات رجعت الترددات في التو إلى ما كانت عليه وذلك ما يحصل للموجة الأثيرية عندما تفارق الوسط المادي نافذة خلاله وراجعة إلى الفضاء من جديد وكأن لم تبطئ تلك الترددات خلال أثير الوسط المادي مما يرجع إلى أن قوى التجاذب على طول خط الشعاع والطاقة التي تنتقل بذلك من أدقة إلى أخرى تظل ثابتة كما هي على الدوام للموجة حتى تتلاشى.

وعلى وجه العموم يكون تلاشيها خلال الوسط المادي أكثر احتمالاً بالطبع وفي هذا ما يذكر بكرات البلياردو في صف واحد، عند اصطدام كرة بأول الصف تندفع آخر كرة فيه بسرعة كبيرة على امتداده بينما لا تكاد تتحرك الكرات الوسطى.

وقوة التردد أو طاقته هي التي تعطى الموجة الأثيرية أو الشعاع خواصه وصفاته الميزة وتجعله يؤثر بآثاره المادية الملموسة. فهي التي تسبب المؤثرات المعروفة للموجات الأثيرية من إشعاع إلى ضوء إلى حرارة إلى لا سلكي فلولا قوة التردد أو طاقته الخاصة بالموجات الحرارية لما استجابت لذبذبتها الجسيمات الذرية مثل الويات والإلكترونات لأن مستوى طاقة التردد إن نقص عن ذلك عجزت عن التأثير في النويات وعن جعلها تتجاوب معها لضعفها بينما إذا زاد مستوى طاقة التردد لم تتجاوب معه الجسيمات أيضاً.

إن أشعة الموجات الأثيرية لا تعرف من بعضها أثناء سريانها في الفضاء وإنما يمكن أن يعرف وجودها أولاً، وأن يميز بعد ذلك بين أنواعها الأربعة المختلفة المعروفة إذا ما أسقطت على وسط مادي ولوحظت آثارها المتباينة على ذلك الوسط المادي فإذا ما انعكس عليه ضوء مثلاً كانت هناك أولاً موجات ضوئية وانعكست على الوسط المادي. وإذا ما ارتفعت درجة حرارته كانت الموجات حرارية وهلم جرا.

إن احتمال تغيير المسافات بين الأثيرية هو الذي أوجد فكرة الفضاء المنكمش، وبقاء خواص الموجات كما هي على الرغم من تغيير تلك المسافات هو الذي أوجد فكرة ثبات سرعة الضوء على كل حال مع تصور انكماش الفضاء ذاته إذا ما نقصت سرعته نتيجة لنقص المسافات بين الأثيرية وما استتبعه ذلك من نقص في طول الموجات بغض النظر عن زمن الذبذبة وتأثره أو عدم تأثره.

لكن الفضاء، كما في فرض نيوتن فضاء مطلق بطبيعته وبدون أن تكون له علاقة بأي شيء خارجي. ويظل على الدوام ثابتاً وغير متحرك. وهذا الفرض لا يتعارض مع الفرض الأثيري في شيء. الفضاء ثابت الأبعاد على الدوام أما الأثيريات فقد

تتحرك خلال غير أن حركتها مقيدة إلى أبعد الحدود بفعل تماسكها فيما بينها، فهي ليست مادة وإنما هي بين المادة والعدم وربما كانت هي أو مثيلاتها أصل النقط المادية التي تكونت الذرة منها والتي هي النواة وما حولها من الإلكترونات بعد أن تجمعت واكتسبت طاقة حركية كبيرة ثم تكونت مادتها وكونت الذرات.

إلا أن الموجات الأثيرية نوع من الطاقة فلولا حصول الطاقة لما تحركت الأدقات فإذا ما تحركت وتذبذبت بكيفية خاصة وبطاقة معينة فإن تلك الطاقة المعلومة تنتقل من أدقة أو أثيرية إلى أخرى على طول خط الشعاع المستقيم بتأثير التجاذب والتنافر من دون زيادة أو نقصان إلا ذلك القدر النظري الذي لا يذكر من الطاقة والمفرض أنه يستهلك في تحريك الأثيريات الساكنة والذي يتسبب في إضعاف الموجة وتلاشيها بعد ملايين الملايين من السنين الضوئية وهذا التلاشي غير الضعف الناتج من التشتيت والتوزيع أو الناتج من بعد المسافة تبعاً لقانون التربيع العكسي كلما ابتعد عن مصدر الضوء كما هو معرف في علم الطبيعة.

فالطاقة المعلومة التي تكتسبها الأثيريات واحدة بعد الأخرى على طول خط الموجة هي التي تعين خواص تلك الموجة من طول وتردد وما يستتبع ذلك من التأثيرات كما تقدم. فإذا انكمشت المسافات بين الأثيرية في أثير ما قصر طول الموجات الأثيرية بنفس النسبة مما يؤدي إلى نقص سرعة الضوء في ذلك الأثير مع ثبات مقدار ذلك النقص لجميع الموجات في هذه الحالة أي أنها ستبقى متساوية مع بعضها كما ستساوي سرعة أي موجة أثيرية أخرى في ذلك الأثير عندئذ.

ولقد كانت أحكم عبارة وصف بها أينشتين سرعة الضوء في الأثير هي أنها أثبت شيء في الوجود وهذا حقيقي لأن الأثير متصل متتابع وبناءه متماسك بفعل قوى التماسك والتجاذب والتنافر التي تحافظ على تجانسه وتشابهه. ولا يوجد ثمة شيء يؤثر فيه تأثيراً كبيراً شاملاً فيغير من مسافاته البين أثيرية على نطاق واسع حتى يؤثر على سرعة الضوء في أثير فلكي تأثيراً ملحوظاً.

وإذا ما وجد جسم مادي في الأثير تعدل بناءة المتماسك وتقاربت أثيرياته لوجود نويات الذرات وإلكتروناتها ولفعل جاذبيتها الكبيرة بالنسبة لها، مما يكون من شأنه أن يزحمها وأن يقيد من حريتها في الذبذبة فيكون وجود الوسط المادي بذلك معوقاً لتردد الموجات خلاله، إلا أن درجات تعويقه للذبذبة تزيد بزيادة تلك الذبذبة مما يؤدي إلى تفاوت في سرعة الموجات الأثيرية التي تعبر الوسط المادي الواحد.

سرعة الموجة الأثيرية = تردد الموجة × طول الموجة

لكن طول الموجة في الوسط المادي = ن × طول الموجة في الأثير

حيث ن كسر ثابت للوسط المادي الواحد، أقل من الواحد الصحيح دائماً

بينما أن تردد الموجة في الوسط المادي = س × تردد الموجة في الأثير

حيث س كسر يتوقف على تردد الموجة الأصلي في الأثير، يقل بزيادتها ويزيد بنقصها.

إذن سرعة الموجة الأثيرية في الوسط المادي =

= (س × ترددها في الأثير) × (ق × طولها في الأثير)

= س × ق × سرعة الموجة الأثيرية في الأثير

مما يدل بوضوح على أن سرعة الموجة الأثيرية في الوسط المادي تتوقف على س وهي القيمة الكسرية التي تتوقف على تردد الموجة في الأثير. فإذا تقل سرعة الموجات الأثيرية عالية التردد بمقدار يفوق ما تقل به سرعة الموجات الأثيرية الأقل تردداً، وإن كانت جميع الموجات الأثيرية تقل سرعتها عند تخللها لوسط مادي.

ولما كانت الطاقة المعلومة التي تنتقل من أدقة إلى أخرى باعثة على ذبذبتها في الأثير وهي التي تحدد طول الموجة وترددها وخواصها، تبقى كما هي باعثة على ذبذبة الأثيريات حتى خلال المادة فإنها عندما تغادر الوسط المادي من جديد تأخذ في التنقل من أدقة إلى أخرى باعثة على ذبذبتها في الأثير بنفس الصورة السابقة وإن كانت خلال

المادة تذبذب الأدقات بتردد أقل لتأثير قوة الجاذبية المعوقة من النقط المادية القريبة، فلا تتأثر خواص الموجة الأثيرية في مجموعها ولا تتغير من مميزاتها خلال فترة سريانها في وسط مادي شفاف لها إلا سرعاتها كما تقدم، التي تنقص تبعاً لترددها الأصلي ولطول موجاتها كما تقدم أيضاً، الذي ينقص بنسبة ثابتة لجميع الموجات الأثيرية في الوسط المادي الواحد.

ويرجع عدم تأثير الخواص بقصر طول الموجة الأثيرية عند سريانها خلال وسط مادي، إلى أن ذلك القصر في المسافة الطولية بين التضاغطين المتتاليين أو بين التخلخلين المتتاليين جاء نتيجة تقلص المسافات البين أثيرية فجاء التضاغط بعد التخلخل بنفس المقدار أو العدد من الأدقات إن صح ذلك التعبير.

وأخيراً من الجائز تمثيل الموجات الضوئية بموجات مستعرضة تمييزاً لها عن سائر الموجات مثل موجات الصوت. وإن كانت الموجات المستعرضة لا تسري في الغازات ولا حتى في السوائل إلا على أسطحها فقط وإنما تسري في الأجسام الصلبة عندما يطرق مثلاً على طرف منها، إذ يتموج الجسم الصلب وتتحرك جزئياته صعوداً وهبوطاً في اتجاه عمودي على اتجاه الموجة ذاته.

الفصل الثالث عشر

المنهج التجريبي

الفصل الثالث عشر

المنهج التجريبي

من أهم الملامح التي تميز العلم الحديث، بالمقارنة بعلم العصور المبكرة، هو تأكيده على ما يمكن أن نطلق عليه اسم "المنهج التجريبي". وكما رأينا، تعتمد كل المعرفة الأمبيريقية، وبشكل نهائي، على الملاحظات. غير أن هذه الملاحظات يمكن تحقيقها بوسيلتين مختلفتين كل الاختلاف. فهناك أولاً الوسيلة غير التجريبية، وفيها نلعب دوراً سلبياً. إذ أننا ننظر ببساطة إلى النجوم أو إلى بعض الأزهار، نلاحظ فيها المتماثلات والمتباينات، ونحاول الكشف عن الانتظامات التي يمكن التعبير عنها بالقوانين. وهناك ثانياً الوسيلة التجريبية، وفيها نمارس دوراً إيجابياً. إذ بدلاً من كوننا مجرد مشاهدين، نحاول أن نفعل شيئاً ما قد يؤتي بنتائج ملاحظية (مختصة بالملاحظة)، أفضل من تلك التي نجد أنفسنا مجرد مشاهدين للطبيعة. وبدلاً من الانتظار حتى تجود علينا الطبيعة بمواقف نلاحظها، نحاول أن نخلق مثل هذه المواقف. أي أننا باختصار، نقوم بإجراء تجارب.

ولقد كان المنهج التجريبي مثمراً إلى أقصى حد، فعن طريقه تم التقدم العظيم في الفيزياء في المائتي سنة الأخيرتين، وبصفة خاصة، في العقود القليلة الماضية، وكان من المستحيل أن يتم ذلك بدون استخدام المنهج التجريبي. وإذا كان الأمر كذلك، فقد يسأل سائل، لماذا لم يستخدم المنهج التجريبي في كل مجالات العلوم؟

الحقيقة أن هناك بعض المجالات التي يصعب استخدامه فيها مثلما نستخدمه في الفيزياء. ففي علم الفلك مثلاً، لا يمكننا أن نعطي دفعة لكوكب في اتجاه آخر بعض الشيء، لنرى ما قد يحدث له نتيجة لهذه الدفعة. إذ أن الموضوعات الفلكية بعيدة كل البعد عن متناولنا، ولا يسعنا إلا أن نلاحظها ونقوم بوصفها. كما أنه يمكن لعلماء الفلك، في بعض الأحيان، أن يقوموا بخلق شروط في المعمل، شبيهة بتلك التي تحدث

على سطح الشمس أو القمر، وعندئذ يقومون بملاحظة ما يحدث في المعمل تحت هـذه الشروط. ولكن هذا لا يعد في حقيقة الأمر تجربة فلكية حقيقيـة. وإنما هـو أقـرب إلى التجربة الفيزيائية التي تتفق إلى حد ما والمعرفة الفلكية.

ولأسباب مختلفة تماماً، يمتنع علماء الاجتماع عن إجراء تجـارب علـى مجموعـات كبيرة من الناس. إذ أنهم عادة ما يجرون تجاربهم على مجموعات صغيرة. فإذا أردنـا أن نعلم ما هو رد فعل الناس عندما يصبحون عاجزين عن الحصول علـى المـاء يمكـن أن نتخير من بينهم اثنين أو ثلاثة نعطـيهم لعامـاً لا يحتـوي علـى سـائل، ونلاحـظ ردود أفعالهم. ولن يتاح لنا معرفة رد فعل جماعة كـبيرة لم تـزود بالمـاء. إذ سـتكون التجربـة مثيرة إذا ما أوقفنا مثلاً تزويد مدينة نيويورك بالماء. هـل سيصـاب النـاس بـالهوس أم بالبلادة؟ هل سيحاولون أن ينظموا ثورة ضد حكومـة المدينـة؟ بـالطبع لا يجـرؤ عـالم الاجتماع أن يقترح مثل هذه التجربة، لأنه يعرف سلفاً أن المجتمع لن يسمح له بذلك، كما أن الناس لن يسمحوا لعلماء الاجتماع بأن يعبثوا باحتياجاتهم الأساسية.

وحتى إذا لم يتضمن هذا ضرراً حقيقياً يمكن أن يقع على المجتمع، فإنه يظل هنـاك ضغوط اجتماعية قوية يمكن أن تمارس ضد التجارب التي تجري علـى المجموعـة. إذ أن هناك على سبيل المثال، قبيلة في المكسيك اعتادت علـى ممارسـة رقصـة شـعائرية عنـد كسوف الشمس، ويعتقد أفراد القبيلة أن هذه هي الطريقة الوحيدة لتطبيب خاطر الإله الـذي يسـبب الكسـوف، وبعـدها يعـود ضـوء الشـمس. افـترض أن مجموعـة مـن الانثروبولوجيين حاولوا أن يقنعوا هؤلاء الناس بأن الرقصة الشعائرية لا تـأير لهـا في عودة الشمس. ولهذا يقترح الانثروبولوجيـون علـى القبيلـة أن تمتنـع عـن الـرقص في الزمن الثاني لغياب الشمس، ويرون ما يحدث، على سبيل التجربة. سوف يرد علـيهم رجال القبيلة بحنق أن هذا يعني بالنسبة لهم الجري وراء مخاطرة العيش بقية حيـاتهم في ظلام. ولا يمكن في رأيهم أن يوضع مثل هذا الأمر موضع اختبار. وهكذا، كما تـرى، توجد عوائق كبيرة لإجراء تجارب في مجال العلوم الاجتماعية، حتى ولو كـان العلمـاء مقتنعين بأن إجراء مثل هذه التجارب لن تسبب ضرراً اجتماعياً. وبصفة عامة، نجد أن العالم الاجتماعي مقيد بما يمكن أن يتعلمـه مـن التـاريخ ومـن التجـارب مـع الأفـراد

والمجموعات الصغيرة. ومع ذلك، غالباً ما تجرى تجارب في ظل حكومة ديكتاتورية، ليس بغرض اختبار نظرية، ولكن بالأحرى لأن الحكومة تعتقد أن الإجراء الحديث سوف يجعل العمل أفضل من القديم. ومن ثم نجد أن الحكومة تجري تجاربها على فئات واسعة سواء في الزراعة أو الاقتصاد، وهكذا. أما في ظل حكومة ديمقراطية نجد أنه من المستحيل إجراء مثل هذه التجارب الجريئة، لأنها إذا لم تثبت في النهاية أن هذه التجارب صائبة فقد تواجه الحكومة بموجة من الاستياء العام تؤثر عليها في الانتخاب الثاني.

إذن المنهج التجريبي، يكون مثيراً، بوجه خاص، في المجالات التي يمكن فيها قياس المفاهيم الكمية بدقة. وعلينا أن نتساءل الآن، كيف يتسنى للعالم أن يقوم بتصميم تجربة؟ الحقيقة أنه من الصعوبة بمكان أن نصف الطبيعة العامة للتجارب، لأن هناك العديد من الأنواع المختلفة منها، ولكن على أية حال يمكننا الإشارة إلى ملامح عامة قليلة منها.

أولاً وقبل كل شيء، علينا أن نحدد العوامل الموافقة التي تشتمل عليها الظاهرة التي نرغب في بحثها، وأن نترك جانباً بعض العوامل الأخرى – وليس الكثير منها – على اعتبار أنها غير موافقة. ففي تجربة في الميكانيكا مثلاً، تشتمل على عجلات وروافع، وما إلى ذلك، ربما نقرر أن نصرف النظر عن عامل الاحتكاك. وعلى الرغم من أننا ندرك أن الاحتكاك داخل ضمن عواملنا، إلا أننا نرى أن تأثيره ضئيل جداً بحيث إذا أثبتناه لأدى إلى تعقيد التجربة. وبالمثل إذا كانت التجربة على أجسام بطيئة الحركة، ربما اخترنا أن نهمل مقاومة الهواء. أما إذا تعاملنا مع سرعات عالية جداً، كقذيفة تتحرك بسرعة أسرع من الصوت، لما استطعنا أن نهمل مقاومة الهواء. وعلى الجملة، فإن العالم يهمل تلك العوامل التي يرى أن تأثيرها على تجربته غير ذات أهمية، كما أنه في بعض الأحيان وحرصاً منه على ألا تكون تجربته معقدة للغاية، ربما يهمل أيضاً عوامل يرى أن تأثيرها قوي.

وبعد البت في أمر العوامل الموافقة، نقوم باختراع تجربة نستبقي فيها على بعض هذه العوامل ثابتة، بينما نسمح للبعض الآخر منها أن يكون متغيراً. افترض أننا

نتعامل مع غاز في إناء، وأردنا أن نحتفظ بدرجة حرارة الغاز ثابتة على قدر استطاعتنا. فإننا نغمر الإناء في حوض ماء، حجمه أكبر بكثير من حجم الإناء (الحرارة النوعية للغاز صغيرة بالمقارنة بالحرارة النوعية للماء، وحتى إذا اختلفت درجة حرارة الغاز مؤقتاً عن طريق الضغط أو التمدد، فإنها سوف تعود بسرعة إلى درجة حرارتها الأصلية). أو ربما نرغب في أن نحتفظ بتيار كهربائي معين عند معدل ثابت من السريان. ربما يتم ذلك عن طريق الحصول على أمبير متر(*) فإذا لاحظنا زيادة أو نقصاناً في التيار، لأمكننا أن نغير المقاومة ونحتفظ بثبات التيار. بمثل هذه الوسائل وغيرها نستطيع أن نحتفظ بمقادير ثابتة معينة، ونلاحظ في الوقت نفسه ما يحدث عندما تتغير مقادير أخرى.

على أن يكون هدفنا النهائي هو اكتشاف القوانين التي تربط كل هذه المقادير المناسبة، بشرط ألا تكون مشتملة على عوامل كثيرة، وإلا أصبح الاختبار معقداً، كما سبق القول. لذلك ينبغي أن نحدد هدفنا منذ البداية في أقل مستوى من القوانين التي ترتبط ببعض العوامل. فإذا اشتملت التجربة على المقادير ك، فإن الخطوة الأولى الأبسط، هي أن نقوم بعمل ترتيب للتجربة، وعليه فإن المقادير ك2 تكون ثابتة.

وينتج عن هذا مقداران $م_1$، $م_2$. وبما أننا أحرار في أن نغير، إذن فعلينا أن نغير واحدة منهما، ونلحظ كيف تسلك الأخرى. ربما تنخفض $م_2$، بينما تزداد $م_1$، أو ربما تزداد $م_1$ بينما ترتفع $م_2$ أولاً ثم تنخفض بعد ذلك. وعليه فإن قيمة $م_2$ تكون دالة لقيمة $م_1$. وربما نحدد المعادلة التي تعبر عن هذه الدالة، بأن نرسم هذه الدالة على شكل منحنى على ورقة رسماً بيانياً، وعندئذ نتوصل إلى قانون محدد: إذا كانت المقادير $م_3$، $م_4$، $م_5$... ثابتة، وزادت $م_1$، إذن لتغيرت $م_2$ بطريقة يمكن التعبير عنها بمعادلة معينة. ولكن هذه هي البداية فقط، لأننا نستمر في إجراء تجربتنا، متحكمين في المجموعات الأخرى للعوامل $ك_2$، وعليه نتمكن من أن نعرف كيف ترتبط دالياً الأزواج الأخرى من المقادير. وأخيراً نجري التجربة بنفس الطريقة ثلاثة أضعاف،

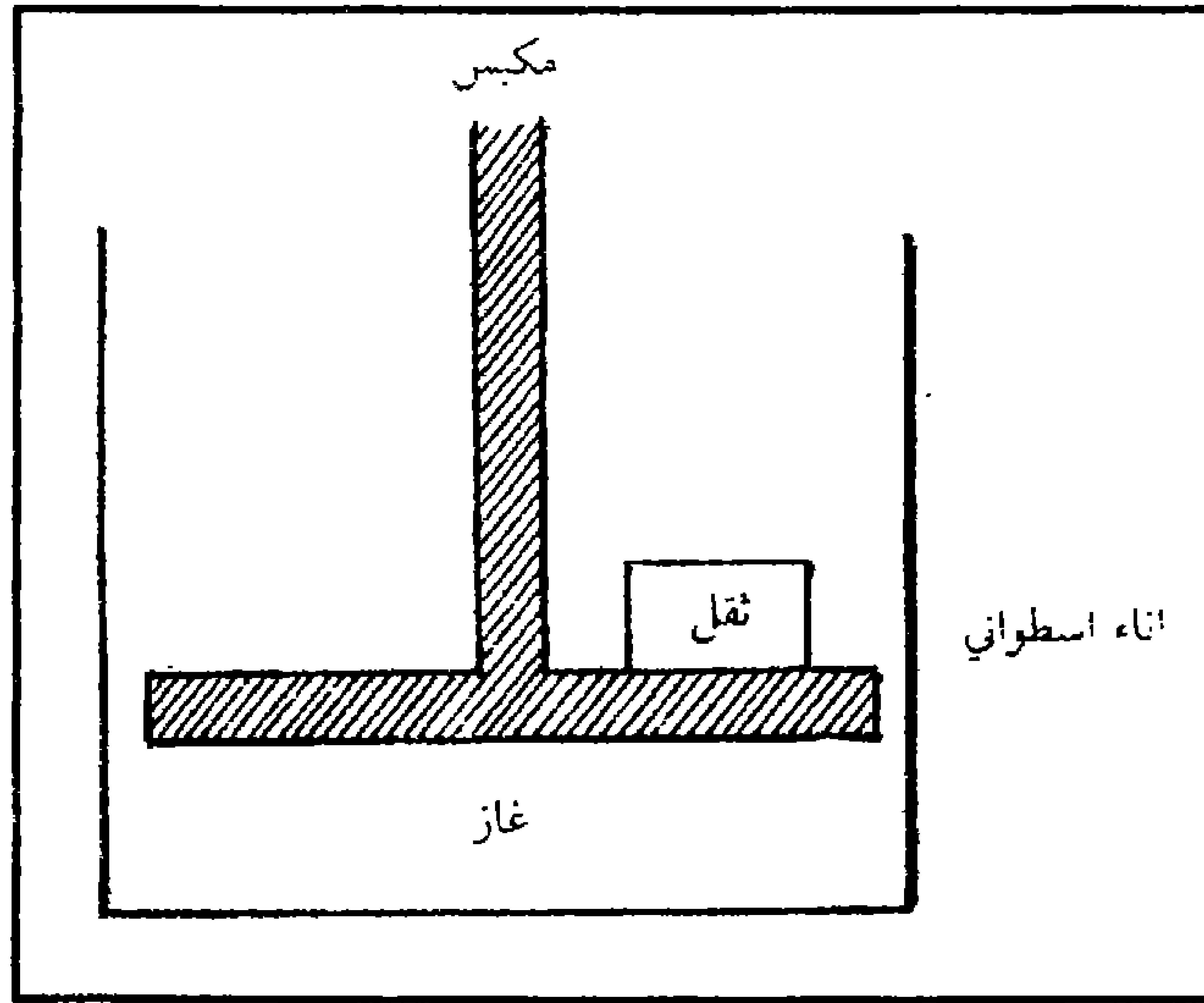
(*) الأمبير متر هو ميزان قوة التيار الكهربائي محسوباً بالوحدة الأمبيرية. (المترجم).

محتفظين بكل شيء ثابت، عدا المقادير الثلاثة. وربما نستطيع أن نخمن – في بعض الحالات – من قوانيننا المتعلقة بالأزواج، بعض أو كل القوانين المتعلقة بالثلاثيات. ومن ثم، يكون هدفنا هو أن تظل القوانين أكثر عمومية فتشتمل على أربعة مقادير، وأخيراً، وحتى تكون أكثر عمومية، وأحياناً معقدة تماماً نتوصل إلى القوانين التي تغطي كل العوامل الموافقة.

وكمثال بسيط على هذا، افترض التجربة التالية على غاز. لقد قمنا بملاحظة مبدئية وجدنا فيها أن درجة حرارة الغاز، وحجمه، وضغطه كثيراً ما تتغير في آن واحد. ونريد أن نعرف علاقة كل من هذه المقادير الثلاثة بالأخرى. أما العامل الرابع الموافق هو ما الغاز الذي استخدمناه. وفيما بعد ينبغي أن نجري تجربة على غازات أخرى، ولكن علينا أن نقرر أولاً الاحتفاظ بهذا العامل ثابتاً وذلك بأن نستخدم فقط هيدروجين نقياً. نضع الهيدروجين في إناء أسطواني (انظر الشكل 1) به مكبس متحرك، بحيث يمكن أن يوضع عليه ثقل، فيمكننا أن نقيس حجم الغاز ببساطة، كما يمكننا أن نغير الضغط بتغيير الثقل الموضوع على المكبس، أما درجة الحرارة فهي منظمة ويمكن قياسها بوسائل أخرى.

قبل أن نشرع في إجراء التجارب لنحدد كيف تتعلق العوامل الثلاثة – درجة الحرارة، والحجم، والضغط – بعضها ببعض. علينا أن نجري بعض التجارب الأولية حتى نتأكد من أنه ليس ثمة عوامل موافقة أخرى. وبعض العوامل التي ربما يداخلنا الشك في كونها موافقة، لم تعد كذلك. فعلى سبيل المثال، هل شكل الإناء الحاوي للغاز مناسب؟ نعرف في بعض التجارب (كتوزيع شحنة كهربية وسطح قوتها الكهربية) أن شكل الموضوع المستخدم هام. ولا تواجهنا ها هنا صعوبة في أن نقرر أن شكل الإناء غير موافق، وأن الحجم فقط هو الموافق. يمكننا أن نعتمد على معرفتنا بالطبيعة لنستبعد العديد من العوامل الأخرى. ربما يدخل أحد المنجمين المعمل، ويتساءل: "هل راقبت مواضع الكواكب اليوم؟، ربما كان لمواضعها بعض التأثير على تجربتك". إننا نفترض أن هذا العامل غير موافق لأننا نعتقد أن الكواكب بعيدة جداً إلى الدرجة التي لا يصبح لها تأثير.

إن افتراضنا بعدم أهمية الكواكب صحيح، ولكن قد يجانبنا الصواب إذا ما اعتقدنا أننا يمكننا أن نستبعد آلياً العديد من العوامل، لا لشيء إلا لأننا نعتقد ببساطة أنها عديمة التأثير. وعليه فليس ثمة وسيلة للتأكد حتى تجري الاختبارات التجريبية بالفعل. تخيل أنك تحيا قبل اختراع المذياع، وأن شخصاً ما وضع صندوقاً على منضدتك وأخبرك أنه إذا غنى أحد الأشخاص في بقعة معينة تبعد ألف ميل، فإنك سوف تسمع جهازاً داخل الصندوق يغني نفس الأغنية، بنفس طبقة الصوت، والإيقاع تماماً. هل تصدقه؟ من المحتمل أن ترد عليه قائلاً: "مستحيل إذ لا توجد أسلاك كهربية متصلة بهذا الصندوق. وأعرف من خبرتي استحالة أن يكون لشيء يبعد ألف ميل، أي تأثير على ما يحدث في هذه الحجرة".



الشكل (1)

وهذا التعليل هو نفسه الذي يجعلنا نقرر أن مواضع الكواكب لا يمكن أن تؤثر في تجاربنا على الهيدروجين! ويتضح من هذا أننا ينبغي أن نتوخى الحذر إلى حد بعيد. ففي بعض الأحيان تكون هناك تأثيرات يستحيل أن نعرف عنها شيئاً إلا بعد أن يتم اكتشافها. ولهذا السبب فإن الخطوة الأولى المؤكدة في تجربتنا، الا وهي تحديد العوامل الموافقة، تصبح في بعض الأحيان شيئاً صعباً، بالإضافة إلى أن هذه الخطوة لا تذكر غالباً ضمن تقارير الأبحاث. فالعالم يصف فقط الجهاز الذي استخدمه والتجربة التي

أجراها، والعلاقات بين المقادير المعينة التي اكتشفها. ولا يردف ذلك بقوله: "واكتشفت بالإضافة إلى ذلك أن كذا وكذا من العوامل ليس لها تأثير على النتائج". إذ أن العالم، في معظم الحالات، عندما يعرف المجال الذي يجري فيه البحث بشكل كاف، فإنه يسلم جدلاً بأن العوامل الأخرى غير متصلة بهذا العامل. وربما يكون على صواب تماماً غير أنه في المجالات الحديثة، لابد للمرء أن يتوخى الحذر إلى أقصى حد. لا يمكن لأحد بالطبع أن يعتقد في أن التجربة المعملية يمكن لها أن تتأثر بما إذا كنا ننظر إلى الجهاز من مسافة عشر بوصات أو عشرة أقدام، أو ما إذا كنا ننظر إليه ونحن في حالة شفقة أو غضب. يحتمل أن تكون هذه العوامل متصلة بموضوعنا، ولكن لا يمكننا أن نجزم بذلك على الإطلاق. أما إذا داخل أي شخص شك في أن هذه العوامل موافقة، فعليه أن يجري تجربة للتيقن من استبعادها.

هناك بالطبع اعتبارات عملية تمنعنا من اختبار كل عامل قد يكون موافقاً، إذ أن هناك آلافاً من الإمكانيات الطفيفة التي يمكن اختبارها، ولكننا لن نجد ببساطة الوقت الكافي لفحصها جميعاً. ومن ثم علينا أن نباشر عملنا طبقاً للحس المشترك، ونصحح افتراضاتنا فقط إذا ما حدث شيء ما غير متوقع يجبرنا على أن نضع في اعتبارنا عاملاً موافقاً كنا قد أهملناه من قبل. هل يحدث لون أوراق الشجر خارج المعمل، تأثيراً على طول موجة الضوء المستخدم في المعمل؟ هل يعمل جزء من الآلة بشكل مختلف اعتماداً على ما إذا كان المالك القانوني لها متواجداً في نيويورك أو شيكاغو، أو اعتماداً على ما يعتمل في نفسه نحو التجربة؟ من الواضح أنه ليس لدينا الوقت الكافي لاختبار مثل هذه العوامل. ولكننا نفترض أن الاتجاه العقلي لمالك الآلة ليس له تأثير فيزيائي على التجربة، ولكن ربما يختلف أعضاء قبائل معينة في هذا الأمر. ربما يعتقدون أن الآلهة سوف نعضد التجربة فقط إذا كان مالك الجهاز الحقيقي يريد للتجربة أن تجري، أما إذا كان هناك مالك زائف يرغب في إجراء التجربة، فإنها سوف تتعثر.

وهكذا نرى أن الاعتقادات الثقافية تؤثر في بعض الأحيان فيما هو موافق بشكل اعتباري. أما في معظم الحالات فإن العالم يفكر في المشكلة، ويضع تخميناً يقوم على

الحس المشترك عن ماهية العوامل التي ينبغي عليه أن يضعها في الاعتبار، وربما يقوم بإجراء قليل من التجارب الأولية ليتسنى له استبعاد العوامل التي يشك في أمرها.

افترض أننا قررنا أن العوامل الموافقة لتجربتنا على الهيدروجين هي درجة الحرارة والضغط والحجم. وحيث أنه في إنائنا، تبقى طبيعة الغاز وكميته الكلية ثابتة، لأننا نحتفظ به في إناء مغلق بإحكام، لذا نجد أنفسنا أحراراً في أن نختبر العلاقات بين العوامل الثلاثة. فإذا ما حافظنا على درجة الحرارة ثابتة لوجدنا أن الضغط يزيد، ونكتشف أن الحجم يختلف عكسياً مع الضغط. ذلك لأننا إذا ضاعفنا الضغط، لتناقص الحجم إلى نصف كميته السالفة. وإذا ضاعفنا الضغط ثلاث مرات، لتناقص الحجم إلى الثلث. هذه التجربة مشهورة، وقد أجراها الفيزيائي الإيرلندي روبرت بويل في القرن السابع عشر، ويعرف باسم قانون بويل، وينص على أنه إذا ظلت درجة حرارة الغاز المحبوس بإحكام ثابتة لظل ناتج الحجم والضغط ثابتين.

فإذا احتفظنا فيما بعد بثبات الضغط (وذلك بأن نترك نفس الثقل على المكبس) وقمنا بتغيير درجة الحرارة لاكتشفنا أن الحجم يزداد عند تسخين الغاز ويتناقص عند تبريده، وبقياس الحجم ودرجة الحرارة، نجد أن الحجم متناسب مع درجة الحرارة. (ويسمى هذا في بعض الأحيان بقانون شارل، نسبة إلى العالم الفرنسي جال شارل Jacques Charles). وعلينا أن نتوخى الحذر، فلا نستخدم الفهرنهايت أو المقياس المئوي، وإنما نستخدم المقياس الذي يكون فيه الصفر "صفراً مطلقاً"(*) أو – 273 بالمقياس المئوي. وهذا هو "المقياس المطلق" أو "مقياس كلفن" الذي أدخله العالم الإنجليزي لورد كلفن في القرن التاسع عشر. ولم يعد أمامنا الآن إلا خطوة سهلة لمراجعة القانون العام الذي يغطي العوامل الثلاثة معاً مراجعة تجريبية.

والحقيقة أن هذا القانون تم اقتراحه من القانونين اللذين توصلنا إليهما بالفعل، ولكن للقانون العام مضموناً أمبيريقياً أكبر من القانونين المأخوذين معاً. فهذا القانون

(*) الصفر المطلق هو درجة حرارة فرضية تتسم بفقدان الحرارة فقداناً كاملاً وتعادل 273.16 درجة مئوية تحت الصفر أو 459.69 درجة فهرنهايت تحت الصفر (المترجم).

ينص على أنه إذا ظلت كمية الغاز المحبوس ثابتة لتساوي الضغط والحجم مع درجة الحرارة ث (ض. ح = د. ث). وث في هذه المعادلة هي الثابت الذي يتغير مع كمية الغاز محل البحث هذا القانون العام يوضح العلاقة بين المقادير الثلاثة جميعاً، ولذلك فهو ذو كفاية أكثر أهمية في القيام بتنبؤات من القانونين الآخرين المشتركين معه. فإذا علمنا قيمة أي مقدارين من المقادير الثلاثة المتغيرة، لاستطعنا ببساطة أن نتنبأ بالثالث.

هذا المثال الذي طبق على تجربة بسيطة، يبين أنه من الممكن أن نحتفظ بعوامل معينة ثابتة، حتى نقوم بدراسة الاعتمادات التي تنعقد بين عوامل أخرى. كما يبين - وهذا هو المهم - كيف يمكن للمفاهيم الكمية أن تؤتي بثمارها. إذ تفترض القوانين المحددة بهذه التجربة، القدرة على قياس المقادير المختلفة المتضمنة فيها.

وإذا لم يكن الأمر كذلك، لتمت صياغة القوانين بطريقة كيفية، ومثل هذه القوانين ستكون أضعف بكثير، وأقل فائدة في عمل تنبؤات. إذ بدون المقاييس العددية للضغط، والحجم، ودرجة الحرارة، لأمكننا في الغالب، أن نقول عن أحد المقادير أنه سوف يظلُّ كما هو، أو أنه سوف يزداد أو يتناقص. ومن ثم لقمنا بصياغة قانون بديل بقولنا: إذا ظلت درجة حرارة غاز محبوس كما هي، وازداد الضغط، إذن لتناقص الحجم، وعندما يتناقص الضغط، يزداد الحجم. بالتأكيد هذا قانون، وشبيه إلى حد ما بقانون بويل، ولكنه أكثر ضعفاً من قانون بويل، لأنه لا يمكننا من التنبؤ بالكميات الدقيقة للمقادير، أنه يمكننا فقط من التنبؤ بأن المقدار سوف يزداد أو يتناقص أو يظل ثابتاً.

وتصبح عيوب الصياغة الكيفية لقوانين الغازات أكثر وضوحاً إذا افترضنا قانوناً عاماً تم التعبير عنه بالمعادلة: ض. ح = د. ث. ولنكتب المعادلة على النحو التالي:

$$ح = \frac{د}{ض} . ث.$$

لن نتمكن من هذه المعادلة العامة، المصاغة كيفياً، إلا أن نشتق صياغات ضعيفة لقانون بويل وقانون شارل. افترض أننا سمحنا للمقادير الثلاثة - الضغط الحجم، درجة الحرارة - أن تختلف في الوقت نفسه، عدا كمية الغاز (ث) التي تظل ثابتة.

سوف نجد بالتجربة زيادة كلا من درجة الحرارة والضغط. وماذا عن الحجم؟ لن نستطيع في هذه الحالة، أن نقرر ما إذا كان الحجم قد ازداد أو تناقص أو ظل ثابتاً. لأننا إذا أردنا أن نعين هذا، لكان علينا أن نعرف المعدلات التي بها تزداد درجة الحرارة والضغط. وإذا زادت درجة الحرارة بمعدل أعلى من الضغط إذن لاستتبع من الصيغة السالفة أن الحجم سوف يزداد، ولكن إذا لم نستطع إعطاء قيم عددية للضغط ودرجة الحرارة، لن نستطيع في هذه الحالة أن نتنبأ بأي شيء على الإطلاق فيما يتعلق بالحجم.

وهكذا، يتضح لنا إلى أي درجة يمكن للتنبؤ أن يكون كاملاً بهذه الطريقة، وإلى أي درجة يمكن التفسيرات أن تكون فجة إذا تمت صياغة قوانين العلم بالقوانين الكيفية. أما القوانين الكمية فهي أسمى بكثير، لذلك علينا أن نعطي مفاهيم كمية لمثل هذه القوانين.

المراجع العربية والمترجمة

1. أساسيات الفيزياء – ف . بوش – ترجمة دكتور سعيد الجزيري، د. محمد أمين سليمان.
2. كيث وفورد – الفيزياء الكلاسيكية / مجمع اللغة العربية المجلد الثاني 1991.
3. الفيزياء الحديثة للجامعات/ ريتشارد / ترجمة عبد الرزاق قدورة وزملاؤه 2001م.
4. مفاهيم في الفيزياء الحديثة/ أرثربايزر/ ترجمة د. نعيم عبد الشكور 2000.
5. مبادئ الفيزياء النووية/ مايرهوف/ ترجمة عاصم عبد الكريم 1999.
6. المرجع في الفيزياء، ترجمة د. فريد يوسف متى/ 1998م دار مير للنشر.
7. مدخل إلى الفيزياء، ترجمة محمود عويضة وزميله 1999.
8. خواص المادة والحرارة، محمد عبد المقصود الجمال 1999.
9. الفيزياء العملية، محمد أشرف محمد الشافعي، فاروق إبراهيم مجاهد، الجماهيرية الليبية 1994.
10. فيزياء السنة الأولى الجامعية – دانيل سشوم، الدار الدولية للنشر والتوزيع 1977.
11. أساسيات انتقال الحرارة – دار الكتب للطباعة والنشر برهان العلي 1998م.
12. الفيزياء العامة/ خليل وشاح/ دار الفكر 1995م.
13. الطبيعة العملية – الجزء الثاني. د. محي الدين قناوي. و د. إبراهيم محمد عبدالوهاب تجارب في مكتبة الفلاح – الكويت 1967.
14. الفيزياء العملية – د. بثينة عبدالمنعم إبراهيم – دار المناهج -2006.
15. الفيزياء العامة – م. محمد شحدة أبو دعابس – مركز الكتاب الأكاديمي 2004.
16. الديناميكا الحرارية الكيميائية – د. عبدالعزيز السيد فودة و د.كوكب خميس النعيمي دار الثقافة – الدوحة 1992.
17. الأسس الفلسفية للفيزياء – تأليف رودلف كارناب، ترجمة، الدكتور السيد نفادي، دار التنوير للطباعة والنشر – بيروت – لبنان – الطبعة الأولى 1993.

18. مبادئ واستخدامات الليزر، تأليف رياض عزيز، وضحى قاسم، دار الشؤون الثقافية العامة للنشر، بغداد – الأعظمية.
19. الطبيعة العملية – الجزء الأول، تأليف: الدكتور إبراهيم محمد عبدالوهاب، والدكتور محيي الدين قناوي، مكتبة الفلاح للنشر والتوزيع – الكويت الطبعة الثالثة.
20. الفيزياء العملية، تأليف: محمد أشر محمد الشافعي، وفاروق محمد مجاهد، الجماهيرية الليبية 1994.
21. الفيزياء النووية، تأليف حسين اسكيف، منشورات جامعة حلب.
22. تجارب في الفيزياء، تأليف: فواز عقيلي، منشورات جامعة دمشق.

المراجع الأجنبية

1) Principles of physics, M Nelkon, London.
2) Physics, Made simple Ira M. Freeman, London.
3) Physics 1,2,3 foundation skills, Barry stone, London, New yourk, Edin burgh.
4) Ordinary level Physics A.F. ABBOTT London.
5) Fundamentals of Physics By: Halliday, Resnick.
6) Starting Science By: ALAN FRASHER, LAN GILCHRIST OXFORD.
7) Sears Zemamsky (university Ohyics) Addison Wesley Massachustts.
8) Principles of physics, Nelkon, M. Hart Davis Educational 1995.
9) Jordine, Jim (Ed) 2000 Physics Hrough Applications exford University Press.
10) Warren Peter (2001) physics for life London John Marrag.
11) John. J. O'Dwyer "College physics, California 1981.


دار جرير
للنشر والتوزيع
www.darjareer.com

فيزياء القصور الحراري الأنتروبيا





دار جرير
للنشر والتوزيع
www.darjareer.com

